



Universidade de Aveiro Departamento de Ambiente e Ordenamento
Ano 2015

**Nelson Miguel
Fernandes Pereira**

**Monitorização de um Sistema de Valorização
Energética do Biogás**



**Nelson Miguel
Fernandes Pereira**

Monitorização de um Sistema de Valorização Energética do Biogás

Relatório de estágio apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

"Veni, Vidi, Vici" Gaius Julius Caesar

O júri

Presidente

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Vogal - Arguente Principal

Prof. Doutora Ana Paula Duarte Gomes
Professora Auxiliar, Universidade de Aveiro

Vogal – Orientador

Prof. Doutor Luís António da Cruz Tarelho
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Quero em primeiro lugar e em especial agradecer às duas pessoas mais importantes em todo o meu percurso académico, aquelas que por algum instante desistiram de me apoiar e me ver crescer, as mesmas que nunca baixaram os braços nos momentos mais difíceis e que se sacrificaram e lutaram para hoje estar aqui e que por momento algum ponderaram abdicar de mais uma luta, agradeço aos meus pais José Celso e Conceição Fernandes por nunca desistirem, por sempre acreditarem e por momento algum terem deixado de estar presentes.

Ao Eng.º Manuel Silva quero desde já agradecer pela confiança, pelos conselhos, pelo acompanhamento, pela motivação e acima de tudo pelo incentivo à melhoria continua e transmitir uma atitude empreendedora e determinada que o caracteriza.

Ao João Silva por durante estes dois últimos anos estares sempre presente por seres um amigo verdadeiro, por seres como um irmão, obrigado pelo apoio, pelo companheirismo, pela paciência e por transmitires a tua energia positiva. Quero agradecer ao Hugo Lopes e ao Luís Belo por incentivarem a praticar e formar o grupo de canyoning pelo incentivo ao convívio, principalmente pela particularidade que nesses momentos a boa disposição é constante. A Sara Castro quero agradecer pela amizade, pelo apoio e pelos momentos e pelas conversas pelo orgulho depositado e por disponibilizares sempre a ajudar, à Catarina Guedes pelo incentivo incondicional para me focar na faculdade, no estágio e no relatório. Aos meus padrinhos José Carlos e Maria de Lurdes e ao meu afilhado João Carlos por estarem sempre presentes nos momentos importantes da minha vida e por contribuírem incentivando a cá chegar e terem orgulho no percurso que percorri. À Sofia Marques pela amizade e cumplicidade. Ao Professor Doutor Luís Tarelho pela orientação no estágio e no relatório. Ainda quero agradecer ao Sérgio Quelhas, ao Hugo Vieira, ao Carlos Magina pelo acompanhamento, por todos os ensinamentos e integração a operação do aterro e da CVE, por realçarem e transparecerem a importância de que o trabalho em equipa, a capacidade empreendedora e as decisões ponderadas são efetivamente traduzidos em resultados positivos. À Andreia Costa e ao Nuno por me acompanharem e integrarem nos procedimentos de laboratório e à confiança depositada para realizar os procedimentos. Ao Sr. Azevedo, ao José Ricardo e ao Pedro, por todos os ensinamentos da operação da CVO, por clarificarem o processo e por me acompanharem e integrarem neste meio.

A todos um muito obrigado por proporcionarem um efeito positivo no meu percurso académico, espero ter estado ao nível das expectativas.

palavras-chave

Résíduos Sólidos Urbanos, Digestão Anaerobia, Central de Valorização Orgânica, Aterro Sanitário, Biogás, Valorização energética.

resumo

A população mundial ao longo do tempo foi adquirindo hábitos e um estilo de vida consumista consentido pela diversa oferta e incentivo à aquisição de produtos, desprezando os efeitos colaterais associados, revelando-se em produção de resíduos e no consumo energético, levando a depleção dos recursos naturais. O incentivo à produção de energia verde e renovável é um critério em ascensão, no qual criar infraestruturas de valorização de resíduos sólidos urbanos para produção de biogás e conversão de energia elétrica se insere contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Este relatório é focado na monitorização de sistemas de produção e valorização de biogás a partir dos RSU na Suldouro, empresa de Tratamento e valorização de resíduos sólidos urbanos. No que diz respeito à central de valorização orgânica os parâmetros de operação surtem reflexos nos parâmetros de estabilidade e consequentemente na produção de biogás, para potenciar este fator foram monitorizados todos os processos e as repercussões sucedidas nos parâmetros e com base nos dados obtidos desenvolver e aplicar medidas de regulação e otimização. O efeito foi positivo incrementando a produção de biogás entre 20 a 25%. Quanto ao aterro foram estudados os sistemas de drenagem de biogás dada a configuração destes sistemas. Neste âmbito foram monitorizadas experiências cujo objetivo é a reabilitação do reator biológico, analisando a progressão em termos de quantidade e composição de biogás. Posteriormente, foi elaborado um mapa delimitado por áreas de produção. Em termos de valorização do biogás, primeiro foi monitorizado o volume de admitido diariamente pelos motores de combustão interna e monitorizadas a quantidade de energia elétrica produzida pelos sistemas de conversão energética. Por fim foi elaborado uma análise aos consumos energéticos requerido pela central de valorização orgânica da Suldouro.

keywords

MSW, Anaerobic digestion, mechanical biological treatment, organic waste valorization, landfill, energetic valorization of biogas, energetic valorization systems,

abstract

The world population over time has acquired habits and consumer lifestyles consented by the diverse supply and encouraging the acquisition of products, ignoring the associated side effects, revealing themselves in waste production and energy consumption, leading to depletion of natural resources. The encouraging the production of green and renewable energy is a criterion on the rise, which create appreciation infrastructure of municipal solid waste to produce biogas to electricity conversion is part contributing to sustainable development. This report is focused in the monitoring of the systems of production and in the appreciation of biogas from MSW in Suldouro. The mechanical biological treatment operation are reflected in the stability parameters and consequently the production of biogas to enhance this factor were monitored all the successful processes and the repercussions on the biological treatment and based on the data obtained to develop and apply optimization regulation measures. The effect was positive, the production of biogas increased from 20 to 25%. As for landfill, biogas drainage systems were studied, given the configuration of these systems biogas extraction is higher. In this context experiments were monitored aimed at the rehabilitation of the biological reactor, analyzing the progression in terms of quantity and biogas composition. Later, was elaborated a map delimited by production areas. In terms of biogas energetic valorization, it was first monitored the volume of daily accepted biogas by internal combustion engines and monitored the amount of electricity produced by the available energy conversion systems. In Suldouro about 86% of the electrical energy production provide from landfill biogas conversion, 10% from MBT biogas, at least about 4% provide from the thermal appreciation of the internal combustion engines exhaust gases. Finally it was prepared an analysis of the energy consumption required by Suldouro mechanical biological treatment plant and made a distribution by equipment consumption.

Índice

Capítulo 1 - Enquadramento	9
1.1 Problemática dos resíduos sólidos urbanos	9
1.2 Panorama energético mundial	10
1.3 Sistemas de valorização de RSU	12
1.3.1. Tratamento biológico por digestão anaeróbia.....	12
1.3.2 Aterro sanitário	13
1.4 Biogás	16
1.5 Objetivos do estágio.....	17
Capítulo 2 - Suldouro, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos.....	19
2.1 Admissão de resíduos.....	21
2.2 Triagem de resíduos seletivos e valorização multimaterial	21
2.3 Central de valorização orgânica (CVO)	22
2.3.1 Pré tratamento mecânico	22
2.3.2 Tratamento hidromecânico	22
2.3.2.2 Sistema de remoção de areias (<i>GRS – Grit removal System</i>)	24
2.3.2.3 Espessamento da suspensão orgânica	25
2.3.3 Tratamento biológico	25
2.3.3.1 Tanque de suspensão.....	25
2.3.3.2 Digestores anaeróbios.....	26
2.3.3.2.1 Alimentação aos digestores	27
2.3.3.2.2 Recirculação da suspensão	28
2.3.3.3 Produção de biogás na CVO	30
2.4 Aterro Sanitário	31
2.4.1 Sistema de captação e drenagem de gás de aterro	32
2.5 Central de valorização energética.....	33
2.5.1 Remoção de humidade do biogás.....	34
2.5.3 Valorização energética de biogás.....	36
2.5.4 Valorização energética dos gases de exaustão no processo ORC.....	37
Capítulo 3 - Monitorização de um Sistema de valorização energética do biogás	41
3.1. Monitorização da central de valorização orgânica	42

3.1.1 Monitorização dos indicadores de estabilidade no tratamento biológico	42
3.1.1.1 pH e temperatura.....	43
3.1.1.2 Alcalinidade e Ácidos gordos voláteis	45
3.1.1.3 Sólidos totais e sólidos voláteis.....	47
3.1.1.4 Azoto amoniacal (N-NH_4^+)	50
3.1.2 Monitorização dos parâmetros de operação.....	51
3.1.2.1 Produção de suspensão orgânica.....	52
3.1.2.3 Alimentação de suspensão orgânica aos digestores.....	55
3.1.2.4 Impacto da ausência de alimentação.....	56
3.1.2.5 Desidratação	59
3.1.2.6 Desfasamento Alimentação - Desidratação.....	59
3.1.3 Medidas de otimização da CVO	60
3.1.3.1 Regimes de alimentação	61
3.1.3.2 Regulação dos parâmetros de operação do tanque de suspensão	74
3.1.3.3 Corte de oxigénio nos digestores.....	75
3.1.4 Monitorização da produção de biogás.....	75
3.1.4.1 Rendimento de biogás	76
3.2 Aterro Sanitário.....	78
3.2.1 Monitorização de drenos e poços.....	78
3.2.2 Monitorização de experiências em aterro	79
3.2.3 Estudo viabilidade económica entre poços verticais e horizontais	83
3.2.4 Monitorização da produção de gás de aterro.....	85
3.2.5 Mapeamento das áreas de produção do Aterro de Sermonde	87
3.3 Central de valorização Energética.....	89
3.3. Monitorização dos aspetos técnicos dos motores.....	89
3.3.2 Monitorização dos sistemas de conversão de energia elétrica	90
3.3.3 Rendimento elétrico dos motores	90
3.3.4 Monitorização da produção de energia elétrica.....	93
3.3.5 Aterro e Central de Valorização Orgânica.....	98
3.4 Consumos energéticos	101
3.4.1 Consumo de energia elétrica da CVO.....	101
3.4.2 Consumo de energia térmica (aquecimento)	102
Capítulo 4 - Conclusão.....	105
Capítulo 5 - Bibliografia	109

Anexo I – Procedimentos de laboratório	111
Medição de pH – Procedimento de laboratório	113
Medição dos Sólidos Totais – Procedimento de Laboratório	113
Medição dos Sólidos Voláteis – procedimento de laboratório	114
Medição Ácidos Gordos Voláteis e Alcalinidade	115
Medição de Azoto Amoniacal (N-NH ₄ ⁺) – Procedimento de laboratório	115
Anexo II – Monitorização CVO	117
Anexo III Monitorização Aterro	131
Anexo IV- Monitorização CVE	145

Índice de Tabelas

Tabela 1- composição típica do biogás da CVO Suldouro	31
Tabela 2 – Composição típica gás de aterro	32
Tabela 3 – Calculo do rendimento de biogás por tonelada de sólidos voláteis introduzidos.....	77
Tabela 4 – Produção de biogás por metro de tubo instalado.....	83
Tabela 5- Estimativa de produção de eletricidade e receita gerada.....	84
Tabela 6 – Cálculo do Payback para investimento parcial	84
Tabela 7- Cálculo Payback para investimento total	84
Tabela 8 – Caudal de biogás (Nm ³ /h, gases húmidos).	88
Tabela 9 – Rendimentos elétricos médios dos motores	93
Tabela 10 – Balanço Produção consumo de eletricidade da CVO	101
Tabela 11- Amostra de contagens de energia térmica consumida.....	103
Tabela 12 – Parâmetros de operação dos digestores do mês de Fevereiro	119
Tabela 13 – Parâmetros de operação dos digestores do mês de Março	120
Tabela 14 – Parâmetros de operação dos digestores mês de Abril	121
Tabela 15 — Parâmetros de operação dos digestores do mês de Maio	121
Tabela 16 –Monitorização dos sólidos totais e sólidos voláteis nos digestores	122
Tabela 17- Monitorização da concentração de azoto amoniacal	123
Tabela 18- Monitorização parâmetros de operação dos digestores	124
Tabela 19 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	125
Tabela 20 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	126
Tabela 21 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	127
Tabela 22 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	128
Tabela 23 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	129
Tabela 24 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores	130
Tabela 25 - Monitorização Dreno 1.....	133
Tabela 26 – Monitorização Dreno 2	134
Tabela 27 – monitorização dreno 3.....	135
Tabela 28 - Monitorização dreno 4	136
Tabela 29 – Composição e caudal de biogás Área 1	137

Tabela 30 - Composição e caudal de biogás Área	138
Tabela 31- Composição e caudal de biogás Área 3	138
Tabela 32 - Composição e caudal de biogás Área 4	139
Tabela 33 - Composição e caudal de biogás Área 5	139
Tabela 34- Composição e caudal de biogás Área 6	140
Tabela 35 - Composição e caudal de biogás Área 7	141
Tabela 36 - Composição e caudal de biogás Área 8	141
Tabela 37 - Composição e caudal de biogás Área 9	142
Tabela 38 - Composição e caudal de biogás Área 10	143
Tabela 39 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor 1	147
Tabela 40 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor 2	147
Tabela 41- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 2	148
Tabela 42- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 4	148
Tabela 43- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 4	149
Tabela 44 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor CVO	149

Índice de Figuras

Figura 1 - Consumo Mundial de energia primária.	11
Figura 2 - Evolução da procura energética mundial.....	11
Figura 3 – Fases da digestão anaeróbia.	12
Figura 4- Fases de geração de gases de aterro e de lixiviado.	14
Figura 5 – Instalações Suldouro (2012)	20
Figura 6 – Unidade de triagem Suldouro	21
Figura 7 –Unidade de tratamento hidromecânico	24
Figura 8 – Esquema dos digestores e sistemas de alimentação, recirculação e agitação	26
Figura 9 – Esquema do Sistema de alimentação da Suldouro	27
Figura 10 – Representação do Sistema de recirculação e aquecimento da suspensão.....	28
Figura 11 – Tubagens da introdução de suspensão	29
Figura 12 – Permutador de calor de aquecimento de lamas.....	29
Figura 13 - Representação do percurso do biogás.....	29
Figura 14- Compressores de biogás	29
Figura 15 – Aterro de Sermonde (2012).....	31
Figura 16 – Válvula de regulação	32
Figura 17 – Sistema de drenos	32
Figura 18 – Evolução da aquisição de equipamentos de valorização energética	33
Figura 19 – Permutador de calor tubular nas linhas de biogás.....	34
Figura 20- Sistema de arrefecimento dos motores a água	35
Figura 21 – Ventilador do sistema de aspiração	36
Figura 22 – Sistema de aspiração e vaso de expansão	36
Figura 23 – Unidade contentorizada dos motores.....	36
Figura 24 – Esquema do motor Jenbacher.....	36
Figura 25 – Rendimento do motor GE Jenbacher na conversão de energia].	37
Figura 26 – TRIOPEN – ORC (Organic Rankine Cycle).	38
Figura 27 – Diagrama Ciclo Orgânico de Rankine.	39

Figura 28 – Esquema do processo do Ciclo Orgânico de Rankine. ^[9]	39
Figura 29 – Diagrama de monitorização.	41
Figura 30 - Perfil de variação do pH nos digestores.	43
Figura 31 - Perfil de variação do pH no tanque de suspensão.	44
Figura 32 - Perfil de resultados de Alcalinidade nos Digestores.	46
Figura 33 - Perfil AGV nos Digestores.	46
Figura 34 - Perfil Capacidade Tampão nos Digestores.	47
Figura 35 - Perfil Variação Sólidos totais e Sólidos Voláteis Digestores.	48
Figura 36 - Perfil de Variação de Sólidos totais e sólidos voláteis no tanque de Suspensão.	49
Figura 37 - Variação da concentração de azoto amoniacal na forma de NH_4^+ nos digestores.	50
Figura 38 – Painel de monitorização dos digestores (exemplo digestor 1)	51
Figura 39 - Perfil de produção de suspensão orgânica	52
Figura 40 - Variação do nível da suspensão no tanque de suspensão	54
Figura 41 - Perfil de alimentação de suspensão aos digestores	55
Figura 42 – Perfil do regime de alimentação ao digestor 2	57
Figura 43 – Perfil de produção de biogás para período de quebra na alimentação	58
Figura 44 - Perfil da alimentação e desidratação de suspensão	60
Figura 45 - Perfil de alimentação em regime alternado ou descontínuo Digestor 1.	63
Figura 46 - Perfil de alimentação em regime alternado ou descontínuo Digestor 2	64
Figura 47 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 1 (11 de Abril).	65
Figura 48 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 2 (11 de Abril)	66
Figura 49 – Painel <i>Digester mixing</i> (10 de Fevereiro);	67
Figura 50 - Painel <i>Digester mixing</i> (11 de Abril);	68
Figura 51 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 1 (9 de Junho);	69
Figura 52 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 2 (9 de Junho);	70
Figura 53 - Perfil de desidratação (9 de Junho); Nível de suspensão orgânica do digestor 2.	71
Figura 54- Painel <i>Digester mixing</i> (9 de Junho); Caudal de biogás para o sistema de gás.	72
Figura 55 – Evolução ao longo do tempo do caudal médio diário de biogás	73
Figura 56 - Perfil de composição e quantidade de biogás produzido na CVO	76
Figura 57 – Analisador de gás (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S) Geotechnical.	78
Figura 58 – Localização das experiências de reabilitação de drenos no aterro.	79
Figura 59 - Evolução do caudal do gás de aterro no Dreno 1.	80
Figura 60 - Evolução do caudal de gás de aterro dreno 2.	81
Figura 61 - Evolução do caudal de gás de aterro no dreno 3.	82
Figura 62 - Evolução do caudal de gás de aterro no dreno 4.	82
Figura 63 – Perfil de extração em caudal volumétrico de gás de aterro em função da depressão.	85
Figura 64 – Perfil de extração em caudal de gás de aterro e concentração de metano	86
Figura 65 – Delimitação das áreas de produtividade de gás de aterro.	87
Figura 66 – Sistema de gestão e monitorização do motor	89
Figura 67 – Esquema de balanços energéticos dos motores de combustão interna	90
Figura 68 - Resultados rendimento motor 1	91
Figura 69 - Resultados rendimento motor 2	91
Figura 70 - Resultados rendimento motor 3	91
Figura 71- Resultados rendimento motor 4	92
Figura 72 - Resultados rendimento motor CVO	92
Figura 73 - Resultados rendimento motor 6	92

Figura 74 – perfil de produção de energia elétrica motor 1	94
Figura 75 – Perfil de produção de energia elétrica motor 2	94
Figura 76 – Perfil de produção de energia elétrica motor 3	94
Figura 77 – Perfil de produção de energia elétrica motor 4	95
Figura 78 – Perfil de produção de energia elétrica motor CVO	95
Figura 79 – Perfil de produção de energia elétrica motor 6	95
Figura 80 – Esquema do sistema de valorização energética dos gases de escape dos motores.....	97
Figura 81- Perfil de produção de energia elétrica ORC's.	97
Figura 82- Energia elétrica produzida a partir do biogás de aterro injetada na rede elétrica.....	98
Figura 83- Energia elétrica produzida a partir do biogás de aterro injetada na rede elétrica.....	99
Figura 84- Contribuição dos sistemas na produção de energia elétrica	100
Figura 85 - Consumo de energia elétrica por equipamento da CVO (Dados: Suldouro)	101
Figura 86 – Representação gráfica dos drenos das áreas 1,2 e 3	137
Figura 87 - Representação gráfica dos drenos das áreas 4 e 5	139
Figura 88 - Representação gráfica dos drenos das áreas 6, 7 e 8	140
Figura 89 - Representação gráfica dos drenos das áreas 9 e 10	142

Lista de Abreviaturas

CVO – Central de valorização Orgânica

CVE – Central de Valorização Energética

ALC - Alcalinidade

AGV – Ácidos Gordos Voláteis

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

ORC – *Organic Rankine Cycle* – Ciclo Orgânico de Rankine

Capítulo 1 - Enquadramento

1.1 Problemática dos resíduos sólidos urbanos

Segundo o Artigo 3.º do Decreto de Lei n.º 73/2011 de 17 de junho alínea ee’ “*resíduo é qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz ou tem a intenção ou a obrigação de se desfazer, nomeadamente os identificados na Lista Europeia de Resíduos (LER)*”. A produção de resíduos é uma consequência do uso de recursos nas atividades socioeconómicas que caracterizam o nosso quotidiano. Os resíduos passam por inúmeras fases do metabolismo socioeconómico, desde que os recursos são extraídos da natureza até ao momento em que os materiais e produtos se transformam e deixam de ter utilidade para o consumidor. [1] Segundo o Artigo 7.º do Decreto de Lei n.º 73/2011 de 17 de junho “*A Política e a legislação em matéria de resíduos devem respeitar a seguinte ordem de prioridades no que se refere às opções de prevenção e gestão de resíduos: a) Prevenção e redução; b) Preparação para a reutilização; c) Reciclagem; d) Outros tipos de Valorização; e) Eliminação.*” A prevenção e redução da produção de resíduos parte essencialmente dos fatores socioeconómicos implicados no processo, parte das agências do ambiente e das organizações de tratamento de resíduos reunir esforços para incentivar os principais setores de produção de resíduos, nomeadamente, os setores domésticos, comerciais e industriais, dando a conhecer os malefícios da atividade, focalizando e dilatando os benefícios da prevenção e redução, preparar estes setores para a reutilização de materiais e apelar à utilização dos ecopontos e ecocentros para a separação dos materiais para valorização multimaterial e a utilização dos produtos resultantes de materiais reciclados, desta forma permite a redução da necessidade de utilização de recursos naturais. Contudo e apesar dos esforços destacados pelas entidades europeias e nacionais para o cumprimento destas prioridades, os resíduos sólidos não são uma problemática recente e tem uma tendência a intensificar-se ao longo do tempo.

Com base na evolução da produção de resíduos, verifica-se uma forte aposta no incentivo à reciclagem e ao desenvolvimento de sistemas de valorização de resíduos sólidos cada vez mais eficientes. Entre as estratégias mais comuns de tratamento e valorização de resíduos sólidos destacam-se principalmente os de valorização energética, nomeadamente, as centrais de valorização orgânica recorrendo ao tratamento mecânico biológico, centrais de incineração e aos aterros sanitários.

Na União Europeia (UE) são produzidos cerca de 2,7 mil milhões de toneladas de resíduos, o que é equivalente a uma capitação de 5,2 t/(hab.ano). Da totalidade dos resíduos gerados, 53%, em média, foram valorizados em 2010 e os restantes 47% foram eliminados, sobretudo através de deposição em

aterro. ^[1] Em Portugal foram produzidos 28,8 milhões de toneladas de resíduos em 2009, correspondendo a uma capitação de 2,7 t/hab.ano. Destes, 52% foram encaminhados para operações de valorização e os restantes eliminados. ^[1] Em 2012, a quantidade de resíduos urbanos produzidos em Portugal foi de 4,8 milhões de toneladas, o que é equivalente a 15% do total de resíduos produzidos. Dos resíduos urbanos produzidos, 12% foram encaminhados para valorização multimaterial, 16% para valorização orgânica, 18% para valorização energética e os restantes 54% foram encaminhados diretamente para aterro. ^[1]

1.2 Panorama energético mundial

Atualmente o fornecimento global de energia é altamente dependente de combustíveis fósseis como, petróleo, lignite, carvão e gás natural. A produção de combustíveis fósseis é um processo complexo e demorado, que parte de um processo natural de fossilização de plantas e animais que devem estar expostos ao calor e pressão da crosta terrestre durante centenas de milhões de anos. Por esta razão os combustíveis fósseis são considerados não-renováveis, cujas reservas estão a ser consumidas mais rapidamente que o que é formado. ^[2]

Dadas as consequências económicas e ambientais associadas à utilização de combustíveis fósseis, havendo uma necessidade de investir em políticas de racionalização energética, sistemas de conversão de energia mais eficientes que requerem menor exploração de recursos naturais.

A economia mundial é altamente dependente do petróleo, contudo cientistas e pesquisas estimam que o “pico do Petróleo” foi, ou estará para ser atingido brevemente, as restantes reservas de combustíveis fósseis são igualmente esgotáveis, logo é necessário recorrer a outras fontes energéticas, nomeadamente as renováveis. ^[2] Dentro das energias renováveis, destacam-se principalmente a energia eólica, hídrica, solar, das ondas, das marés, biomassa e geotérmica. ^[3]

Com a melhoria das condições de vida e o aumento da população mundial, existe um aumento proporcional de produção de resíduos sólidos urbanos e das necessidades energéticas suportadas pelos combustíveis fósseis. Desta forma é perceptível a problemática energética, a dependência de combustíveis fósseis para processos e atividades humanas que consequentemente tem um elevado impacto económico e ambiental. ^[3]

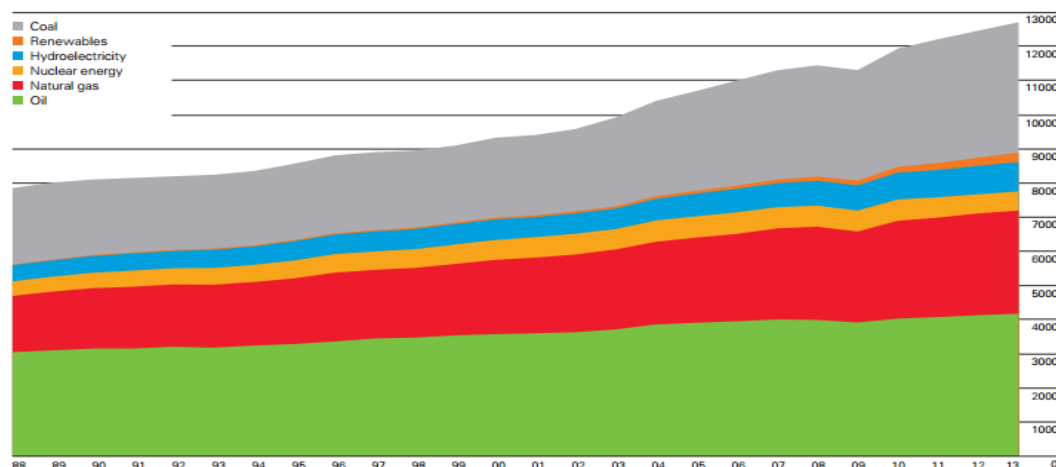


Figura 1 - Consumo Mundial de energia primária. ^[3]

O consumo mundial de energia primária cresceu, embora níveis abaixo da média de 2,3% registada em 2003, um terceiro consecutivo aumento abaixo da média. O crescimento foi abaixo da média em todas as regiões, exceto na América do Norte. Todos os combustíveis, exceto petróleo, energia nuclear e energias renováveis cresceram a taxas abaixo da média. O petróleo continua a ser dominante no mundo, mas perdeu participação de mercado por 14 anos seguidos. As hidrelétricas e outras energias renováveis na geração de energia atingiram o máximo registado como fonte energética para o consumo de energia primária global (6,7% e 2,2%, respetivamente) ^[3]

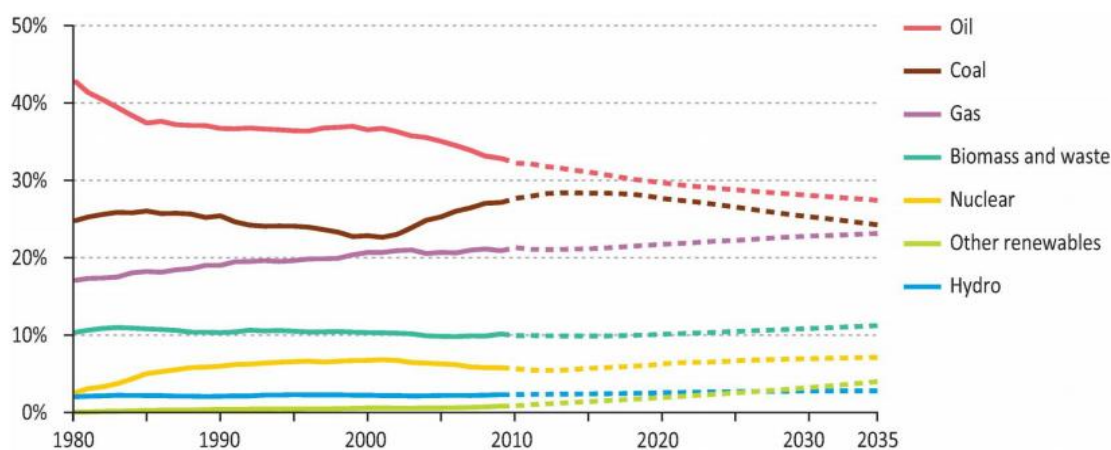


Figura 2 - Evolução da procura energética mundial. ^[3]

A Figura 2 representa a evolução da procura energética a nível mundial, segundo as previsões da *Internantional Energy Agency (IEA)*. A procura de energia primária cresce 40% entre 2009 e 2035. [4] Apesar de um decréscimo na dependência de petróleo, este continua a manter o estatuto de líder, para satisfazer as necessidades energéticas, embora o gás natural é o que demonstra maior incremento em termos absolutos. Nos que corresponde a as energias renováveis a tendência prevê-se manter nos próximos anos. [4]

1.3 Sistemas de valorização de RSU

1.3.1. Tratamento biológico por digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico que acontece naturalmente quando as bactérias decompõem a matéria orgânica em ambientes com pouco ou nenhum oxigénio convertendo diretamente para uma mistura de metano e dióxido de carbono com pequenas quantidades de outros gases tais como sulfureto de hidrogénio, denominada por biogás. [3]

Quase todo o material orgânico biodegradável pode ser processado por digestão anaeróbia, incluindo papel e cartão que não seja possível reciclar, por exemplo, por causa da contaminação de alimentos, resíduos verdes, restos de comida, os efluentes industriais, esgotos e resíduos animais. [5]

A matéria orgânica pode ser sujeita a um processo mecânico de redução de volume, para aumentar a área de superfície disponível para os microrganismos nos digestores e, consequentemente aumentar a velocidade de digestão. O processo de digestão anaeróbia ocorre num recipiente hermético, denominado por digestor. [6]

Fases de Digestão Anaeróbia para Produção de Biogás

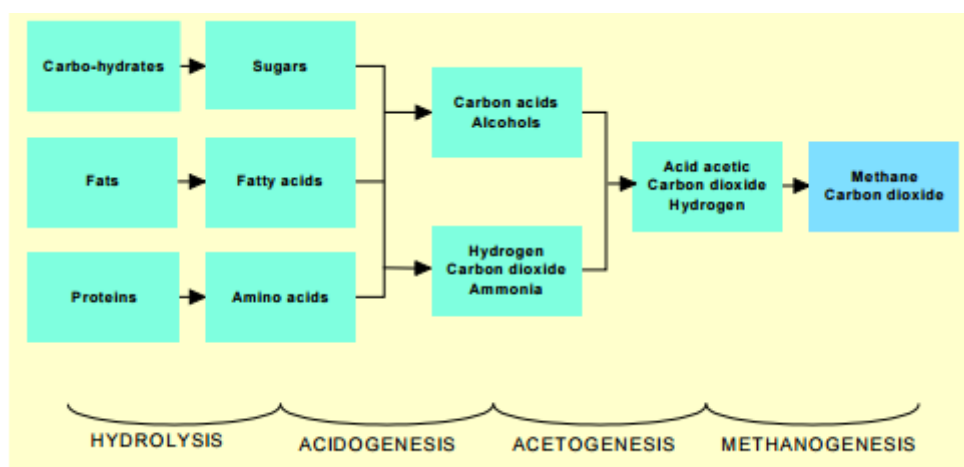


Figura 3 – Fases da digestão anaeróbia [2]

A digestão anaeróbia ocorre de acordo com as fases representadas na Figura 3.

- Hidrólise - uma reação química, em que as moléculas orgânicas complexas estão repartidas em açúcares simples, aminoácidos, ácidos gordos, com a adição de grupos hidroxilo. ^[2]
- Acidogénese – as moléculas resultantes da hidrólise são metabolizadas por bactérias acidogénicas dando origem a moléculas mais simples, nomeadamente, ácidos gordos voláteis; (AGVs), amoníaco, Dióxido de Carbono e sulfeto de hidrogênio; ^[2]
- Acetanogénese - as moléculas simples de acidogénese são digeridas para produzir CO₂, hidrogénio e ácido acético. ^[2]
- Metanogénese - metano, CO₂ e água são produzidos através de bactérias metanogénicas. ^[2]

1.3.2 Aterro sanitário

O aterro sanitário é uma solução técnica utilizada para eliminação de resíduos sólidos urbanos, tornando-se uma unidade eliminação de resíduos indiferenciados gerados pela atividade humana. Em aterro não devem ser depositados materiais que possam ser valorizados sobre outras técnicas, nomeadamente, reutilização, reciclagem e valorização orgânica ou energética.

Aterro sanitário é um termo utilizado para descrever instalações físicas utilizadas para a deposição de resíduos sólidos nos solos a superfície terrestre. Desde o início do século que os aterros tem sido um método económico aceitável de deposição de resíduos sólidos, em todo o mundo. A gestão do aterro incorpora planeamento, projeto, operação, monitorização ambiental, e controlo pré e pós encerramento da unidade. ^[7]

Os resíduos depositados em aterro podem ser valorizados pelo seu processo natural de degradação cujo processo dá origem a biogás e utilizando as tecnologias integradas no sistema, nomeadamente, sistemas de drenagem, tubagens de escoamento de biogás e sistemas de armazenamento e conversão de biogás. O aproveitamento energético em aterro é uma mais-valia da utilização dos refugos dos resíduos para produção de biogás, utilizando os sistemas de conversão para produção de energia elétrica e integrando na rede. ^[7]

Segundo a legislação europeia e de acordo com o Artigo 4.º do Decreto-Lei n.º 183/2009 “*aterro é uma instalação de eliminação de resíduos, acima ou abaixo da superfície natural*”, incluído:

- “*Instalações de eliminação internas, considerando-se como tal os aterros onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação de resíduos no local da produção:*”

- “Instalações permanentes, considerando-se como tal a que tiver uma duração superior a um ano, usada para armazenagem temporária;”

Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado um reator bioquímico, com os resíduos sólidos e os principais fatores de produção e os gases e os lixiviados como principais outputs. O material armazenado em aterro inclui material orgânico parcialmente degradado e outros resíduos inorgânicos originalmente depositados em aterro. O sistema de controlo do gás de aterro é implementado para evitar o movimento indesejado de gás de aterro para a atmosfera. O gás recuperado pode ser utilizado para produção de energia ou queimado em condições controladas para eliminar descargas de componentes prejudiciais para o ambiente, nomeadamente gás metano.^[7]

A geração dos principais gases de aterros sanitários ocorre em cinco fases mais ao menos sequenciais, como o ilustrado na Figura 4.

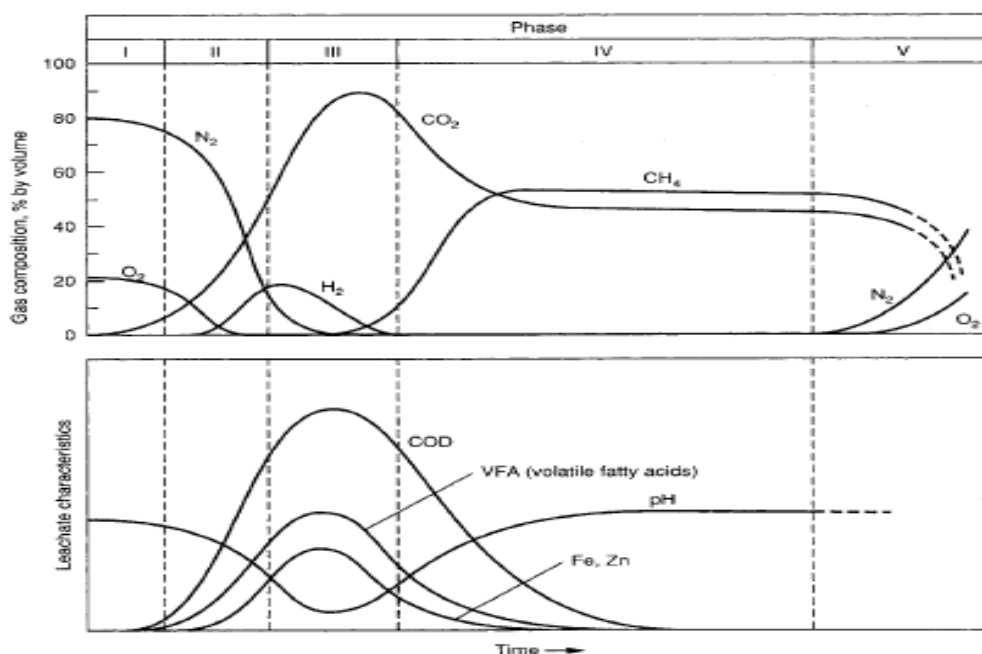


Figura 4- Fases de geração de gases de aterro e de lixiviado.^[7]

Fase I – Fase de ajuste inicial – Em que os componentes orgânicos biodegradáveis presentes nos resíduos sólidos urbanos começam a sofrer uma decomposição bacteriana, logo após serem colocados em aterro. Nesta fase a decomposição biológica ocorre sob condições aeróbicas devido á acumulação de ar preso no aterro. A principal fonte de organismos responsáveis pela decomposição

aeróbia e anaeróbio dos resíduos sólidos é o solo que é utilizado diariamente como última camada.^[7]

Fase II – fase de transição – a fase II é considerada a fase de transição porque há depleção do oxigénio e as condições anaeróbias começam-se a desenvolver. Como o aterro se torna anaeróbio, os nitratos e os sulfatos, servem como aceptadores de eletrões nas reações de conversão biológica, sendo frequentemente reduzidos para azoto e sulfureto de hidrogénio. Medindo o potencial de oxidação redução pode-se monitorizar o aparecimento das condições de anaeróbias. As condições de redução para reduzir o nitrato e o sulfato ocorre aos -50 para -100 mV. Conforme o potencial de oxidação redução começa a decrescer, o agrupamento de microrganismos responsáveis pela conversão do material orgânico biodegradável dos RSU em CH_4 e CO_2 .^[7]

Fase III – Fase ácida – assim designada, pois a atividade bacteriana iniciada na fase II é acelerada com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e quantidades menores de hidrogénio. O primeiro passo num processo de três etapas é a hidrólise de compostos de maior massa molecular em compostos adequados para serem utilizados pelos microrganismos como fonte de energia e célula de carbono.^[7]

O segundo passo do processo é acidogénese que envolve a conversão bacteriana dos compostos resultantes da primeira etapa para compostos intermédios de peso molecular inferior como ácido acético (CH_3COOH) e uma pequena concentração de ácidos fúlvicos e outros ácidos orgânicos complexos. O CO_2 é o principal gás produzido durante a fase III, no entanto pequenas quantidades de hidrogénio (H_2) também são produzidas. Os microrganismos envolvidos nesta conversão não são metanogénicos, contudo são facultativos e obrigatoriamente, bacterias anaeróbias. Estes são muitas vezes identificados na literatura como microrganismos acidogénicos devido a elevada formação de ácidos orgânicos nesta fase, forçando o pH dos líquidos de aterro a decrescer^[7]

A carência bioquímica de oxigénio (CBO_5) e a Carência Química de Oxigénio (CQO) e a condutividade do lixiviado aumentam significativamente durante a fase III, devido à dissolução dos ácidos orgânicos no lixiviado.^[7]

Fase IV – Fase de fermentação do metano – nesta fase, um segundo grupo de microrganismos que converte o ácido acético e hidrogénio gasoso, formados na fase ácida, em metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), torna-se mais predominante. As bactérias responsáveis pela conversão, são estritamente anaeróbias e denominados metanogénicas. Na fase IV, a formação do metano e do ácido ocorrem simultaneamente, embora a taxa de conversão do ácido seja consideravelmente mais reduzida, porque os ácidos e o hidrogénio gasoso são convertidos em metano e dióxido de carbono. Na fase IV o pH no aterro sobe para valores no intervalo do neutro de 6,8 a 8.^[7]

Fase V – fase de maturação – ocorre imediatamente depois de o material orgânico biodegradável ser convertido em CH_4 e CO_2 na fase IV. Com a humidade a infiltra-se pelos resíduos permite que outras porções de material biodegradável que antes estava indisponível seja convertido. A taxa de produção de biogás diminui significativamente na fase V, porque grande parte dos nutrientes disponíveis foram degradados durante as fases anteriores e os substratos que permanecem no aterro são lentamente biodegradáveis. Os principais gases envolvidos nesta fase são o CH_4 e o CO_2 .^[7]

1.4 Biogás

O biogás é uma mistura que é composta essencialmente por de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e pequenas partículas de outros gases como H_2S e ácidos voláteis, em pequena concentração.^[2], considerado um biocombustível de origem renovável. A produção de biogás pode ocorrer naturalmente ou artificialmente, quando criadas condições num digestor, pela ação de bactérias em materiais orgânicos biodegradáveis. A produção de biogás reúne inúmeros benefícios, ao contrário dos combustíveis fósseis, o biogás é um combustível de origem renovável, dado que é produzido a partir da biomassa, que funciona como armazenamento de energia solar através da fotossíntese. O biogás pode constituir um importante recurso energético e contribuir na preservação dos recursos energéticos não renováveis e para a proteção ambiental.^[2]

A utilização de combustíveis fósseis como linhite, carvão, petróleo e gás natural converte o carbono armazenado por milhões de anos na crosta terrestre e liberta CO_2 para a atmosfera. Um aumento da concentração de CO_2 , gás de efeito de estufa (GEE), na atmosfera provoca o aquecimento global. A combustão do biogás liberta igualmente CO_2 , contudo e em comparação aos combustíveis fósseis, o carbono utilizado no biogás foi recentemente retirado da atmosfera, pela atividade fotossintética das plantas, fechando o ciclo do carbono num curto espaço de tempo.^[2]

O biogás permite reduzir a dependência da importação de combustíveis fósseis. Estes são de recursos limitados e concentrados em apenas algumas áreas geográficas, os países europeus têm uma elevada dependência dos combustíveis fósseis situados nas regiões ricas em combustíveis. Desenvolvendo e implementado sistemas de energias renováveis, como a produção biogás a partir dos recursos orgânicos o país irá aumentar a segurança da exigência energética do país e diminuir a dependência de combustíveis importados.^[2]

Um dos benefícios mais importantes da produção de biogás é a capacidade de transformar resíduos sólidos urbanos em recursos valorizáveis, utilizando-os, com o respetivo tratamento, como substrato para a digestão anaeróbia. Muitos países na Europa encontram enormes problemas

associados a sobreprodução de resíduos orgânicos provenientes da indústria, agricultura e de casas. A produção de biogás é uma excelente forma de cumprir com os regulamentos nacionais e europeus cada vez mais restritivos nesta área com a utilização de resíduos orgânicos para produção de energia e utilização do substrato digerido como fertilizante, contribuindo também para a redução do volume e custos de eliminação de resíduos. ^[2]

1.5 Objetivos do estágio

O trabalho realizado em âmbito de estágio consistiu na análise de dois sistemas de produção de biogás, nomeadamente, uma central de valorização orgânica e um aterro sanitário, e respetivos sistemas de valorização energética do biogás para produção de energia elétrica.

A monitorização da CVO teve como objetivo estudar e interpretar os processos de operação da central e analisar o resultado de alterações nos parâmetros do processo de digestão anaeróbia sobre a produção de biogás. Com base nessa análise definir um conjunto de medidas de otimização de produção de biogás.

A monitorização do aterro teve como objetivo analisar o efeito de variáveis de exploração (por exemplo, a depressão de extração, disponibilidade gás no aterro, tipologia dos drenos) sobre a qualidade do gás de aterro produzido. Com base nos resultados elaborar um mapa que delimite as áreas de produtividade e extração de gás de aterro.

A monitorização da central de valorização energética teve como objetivo analisar o desempenho dos sistemas de conversão do biogás na forma de energia elétrica e energia térmica.

Capítulo 2 - Suldouro, Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos

A Suldouro (Figura 5) é um sistema multimunicipal a sul do Douro responsável pela gestão, valorização e tratamento de resíduos sólidos Urbanos dos municípios de Vila Nova de Gaia e St^a Maria da Feira, localizado na Freguesia de Sermonde Vila Nova de Gaia. A Suldouro é propriedade de três entidades, a empresa do fomento, detentora de 60% das ações, e os municípios de Vila Nova de Gaia e St^a Maria da Feira.

A Suldouro é uma entidade que reúne todos os esforços no cumprimento das metas nacionais referentes à reciclagem de embalagens, para tal, demonstra um forte empenho na dinamização da recolha seletiva destes resíduos, procurando incentivar e promover a separação dos resíduos recicláveis. Para o efeito, a Suldouro implementou um Sistema de Recolha Seletiva, distribuindo 1705 ecopontos pelos concelhos de Vila Nova de Gaia e Santa Maria da Feira, representando um rácio de 259 habitantes por ecoponto, constituindo um excelente indicador de cobertura de serviço. Para completar o serviço de forma eficiente, a Suldouro contabiliza uma frota composta por onze viaturas de recolha seletiva em dois turnos diários e dezasseis equipas, ainda, para dar resposta à recolha seletiva de embalagens no comércio local, três viaturas procedem a recolha seletiva no regime porta-a-porta. O sistema de recolha seletiva da Suldouro integra quatro ecocentros, onde a população pode depositar resíduos de grandes dimensões ou que apresentem algum perigo para o ambiente, como pilhas, óleos e baterias. A Suldouro recolhe cerca de 20 000 ton/ano de resíduos resultantes da recolha seletiva, provenientes dos ecocentros e dos ecopontos para serem sujeitos a valorização multimaterial. Os resíduos seletivos são sujeitos a um processo de triagem, de forma a separar, por tipo de material, nomeadamente, papel/cartão, plásticos, metais e vidros. O refugo obtido é introduzido em aterro, o aproveitado passa por um processo de compactação e enfardamento para ser distribuído às respetivas indústrias de transformação ou reciclagem dos materiais,

Anualmente são recolhidos cerca de 180 000 ton/ano de resíduos indiferenciados, dos quais 43 000 ton/ano são valorizados na Central de Valorização Orgânica, onde são sujeitos a um processo de triagem mecânica e manual para separar os materiais recicláveis da matéria orgânica. A matéria orgânica biodegradável é sujeita a diferentes técnicas de processamento, nomeadamente o tratamento biológico por digestão anaeróbia, em que a matéria orgânica é sujeita condições de ausência de oxigénio, com temperatura e pH controlados de forma a promover a degradação da matéria orgânica através da atividade microbiana, desta degradação é produzido o biogás. A suspensão digerida é sujeito a um processo de compostagem de forma a adquirir uma substância húmica que pode ser

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

utilizada como fertilizante agrícola. Contudo a maior porção de resíduos indiferenciados é depositada em aterro, 137000 ton/ano são depositados com objetivo de extrair gás de aterro. Este é sujeito a um processo de conversão através de motores geradores, onde são produzidos cerca de 50 GWh de energia, injetados na rede. O calor produzido no processo de conversão é aproveitado para aquecimento da instalação e dos digestores de digestão anaeróbia



Figura 5 – Instalações Suldouro (2012)

2.1 Admissão de resíduos

A Suldouro admite Resíduos Sólidos Urbanos provenientes dos conselhos de V.N. Gaia e St^a. Maria da Feira. Os resíduos provenientes da recolha seletiva são encaminhados para a Triagem, onde é efetuada a respetiva separação, por tipo de resíduos, e encaminhado para as indústrias recicladoras. Os resíduos indiferenciados, são encaminhados para os respetivos sistemas de valorização para produção de biogás.

Na perspetiva do cumprimento das metas Europeias, do desvio de matéria orgânica de aterro para centrais de valorização orgânica (CVO). A CVO recebe cerca de 43000 ton RSU/ ano e o restante, cerca de 147000 ton RSU/ano é encaminhado para aterro,

2.2 Triagem de resíduos seletivos e valorização multimaterial

Os resíduos recolhidos seletivamente são encaminhados para estação de triagem (Figura 6), onde os materiais são separados cuidadosamente por tipologia e características. Esta unidade sofreu uma remodelação de forma a dar resposta ao aumento de fluxo de resíduos de embalagem provenientes da recolha seletiva multimaterial, incrementando a capacidade para abranger o fluxo proveniente dos dois conselhos. A estação de triagem sofreu uma automatização da linha existente, elevando assim a capacidade de 1 para 3,5 ton/h de processamento.

O resíduo da recolha seletiva é separado, enfardado e encaminhado para a indústria recicladora.



Figura 6 – Unidade de triagem Suldouro (fonte: Suldouro)

2.3 Central de valorização orgânica (CVO)

2.3.1 Pré tratamento mecânico

A central de valorização orgânica da Suldouro está equipada com um sistema de pré tratamento mecânico dimensionado pela *BTA international* (<http://www.bta-international.de/home.html>), empresa integrada no ramo do desenvolvimento de equipamentos de separação resíduos e conversão das frações orgânicas para produção de bioenergia. A *BTA international* desenvolve instalações de tratamento mecânico biológico para tratamento de resíduos sólidos urbanos, instalações para metanização a partir de bio resíduos, resíduos alimentares e resíduos comerciais, instalações de codigestão para substratos agrícolas ou efluentes ou lamas de esgotos. O pré-tratamento mecânico divide-se em duas componentes, tratamento seco de resíduos e tratamento húmido.

O tratamento seco de resíduos é iniciado pela deposição do resíduo num *bunker* que funciona como um doseador para as linhas seguintes. O resíduo recebido é previamente sujeito a uma pré triagem manual, onde são separados os grandes volumosos e vidro, posteriormente o resíduo é encaminhado para um abre-sacos (*terminator 2000*). O resíduo proveniente do abre-sacos segue para o Crivo (*trommel*) onde este é separado por granulometria, a fração > 80 mm é separada para a linha de resíduos valorizáveis e a <80 mm é encaminhada para linha de orgânicos. A fração superior a 80 mm é encaminhada para um separador balístico. No separador balístico o resíduo é separado em três frações, rolantes, leves e orgânicos. Os rolantes são depositados em compactadores, os leves são sujeitos a uma separação manual e separados em PET, PEAD, FILME e antes de serem compactados passam por um separador magnético. Os resíduos orgânicos resultantes do Crivo e os orgânicos resultantes do separador balístico são armazenados no *bunker II*. O *bunker II* é responsável por dosear a matéria orgânica a introduzir no tratamento hidromecânico.

2.3.2 Tratamento hidromecânico

A unidade de tratamento hidromecânico da Suldouro é a unidade principal no processamento de resíduos para obter suspensão orgânica, constituída por três equipamentos fundamentais, *pulpers* e sistema de remoção de areias (Figura 7) e espessadores. Estes são responsáveis por garantir uma mistura equilibrada de água e fração orgânica a introduzir no tratamento biológico.

2.3.2.1 *Pulpers*

A Suldouro encontra-se equipada com *BTA Waste Pulpers*, considerado o componente principal do processamento hidromecânico da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos urbanos para obtenção de lamas ou suspensão orgânica. Este equipamento é um dos elementos centrais de uma instalação de processamento de resíduos da *BTA*, estando formatado para cumprir três princípios:

1. A dissolução e desfibração de praticamente toda a matéria orgânica fermentável, de forma a criar uma suspensão orgânica homogeneizada e com qualidade para posterior produção biogás;
2. A separação de materiais de fração pesada não-fermentáveis (ossos, pedras, vidro, pilhas, objetos metálicos, etc);
3. A separação de materiais de fração leve não-fermentáveis (têxteis, madeira, plásticos, películas etc)

Os *pulpers* não se restringem apenas a criar uma suspensão homogeneizada através de uma simples mistura, este sistema concentra a energia de agitação empregue para dissolver e desfibrar a matéria orgânica de forma mais rápida e eficiente. O sistema de *Waste Pulper* é o produto chave do sistema, criando uma suspensão orgânica, fácil de gerir e bombear, contendo cerca de 90% de componentes de biomassa fermentáveis obtida dos resíduos. A suspensão orgânica é retirada através de uma placa perfurada e redirecionada, através de bombas, para a próxima etapa do processo.

A fração pesada, devido a sua densidade e por ação da agitação, é depositada nas margens e removido através de um compartimento na parte inferior do Pulper alimentando um parafuso sem-fim.

A fração leve, que flutua na suspensão é removida por ação de um ancinho mecânico e canalizado num compactador, onde é desidratada para um teor de 35-40% de matéria seca.

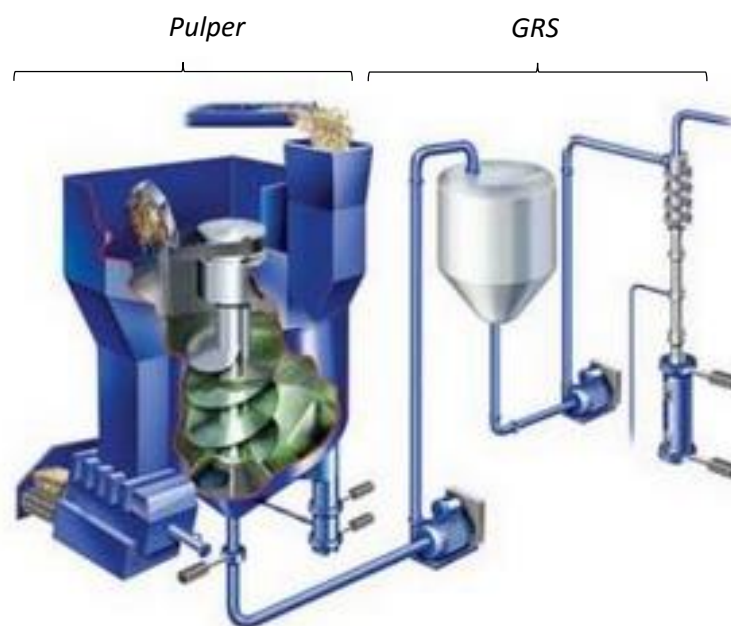


Figura 7 – Representação gráfica da unidade de tratamento hidromecânico – pulpers e sistema de remoção de areias (<http://www.bta-international.de/home.html>)

2.3.2.2 Sistema de remoção de areias (*GRS – Grit removal System*)

As areias contidas nos resíduos constituem um problema fulcral no tratamento de resíduos e digestão. Estas areias são responsáveis pelo desgaste e pela obstrução de acessórios e tubagens. Além disso, os sedimentos quando depositados nos tanques, formando aglomerados de sedimentos, começando a surgir problemas na agitação e uma consequente redução do volume útil. As consequências da acumulação de sedimentos nos tanques são o aumento dos custos de serviço e manutenção assim como põe em causa a segurança e funcionalidade da operação.

O Sistema GRS é dividido em quatro componentes: um tanque de armazenamento, um hidrociclone, um parafuso sem-fim e uma caixa de areia. Materiais como areias, pedaços de vidro, conchas, casca de ovos, pedras, capazes de sedimentar, são removidos da suspensão orgânica através de um processo hidromecânico que ocorre no hidro – ciclone.

A lama rica em areias é descarregada pelas forças centrífugas do hidrociclone através de pressão negativa, sedimentando na caixa de areias. Simultaneamente, o conteúdo de partículas orgânicas contidas nos grãos de areia é reduzido pelo fluxo da água. As impurezas separadas para a caixa de areias são descarregadas em intervalos para um parafuso sem fim. As areias resultantes são acumuladas numa caixa transportadora e encaminhadas para aterro.

2.3.2.3 Espessamento da suspensão orgânica

O espessamento da suspensão orgânica é a última fase do tratamento mecânico da instalação *BTA*, consiste num processo de remoção de uma porção água que foi adjudicada no processo adjacente, visando reduzir o volume das lamas a impregnar no sistema e criar uma suspensão com o teor de sólidos adequado. A importância desta fase recai essencialmente preparar uma suspensão rica em matéria orgânica, com um teor de sólidos entre 7 e 10% para que o processo ocorra dentro da via húmida, de forma a aumentar a eficiência do processo do processo biológico.

O espessamento da matéria orgânica é garantido pelo recurso a um equipamento cuja operação é semelhante a uma centrífuga. A suspensão entra no espessador, em contante rotação, e a água em excesso é removida através das porosidades do tambor. A água resultante deste processo, ainda com carga orgânica, é reutilizada e reintegrada no processo hidromecânico para abastecer os *pulpers*. Este último procedimento concerne a produção de uma suspensão com maior teor orgânico e permite efetuar um uso eficiente e racional da água do processo.

2.3.3 Tratamento biológico

2.3.3.1 Tanque de suspensão

A Central de Valorização Orgânica da Suldouro está equipada com um tanque de suspensão com o volume bruto de 500 m³ cuja funcionalidade é o armazenamento e retenção da suspensão orgânica proveniente do processo hidromecânico. A retenção da suspensão orgânica no tanque, garante a alimentação continua aos digestores anaeróbios. A suspensão preparada no processo mecânico da instalação é armazenado e retido no tanque de suspensão tempo suficiente para da início às primeiras fases da digestão, nomeadamente, hidrólise, acidogénese e acetanogénese, de forma a impregnar a suspensão orgânica no estado mais avançado de decomposição para, efetivamente, potenciar a fase metanogénica nos digestores.

O tanque de suspensão está equipado com um sistema de agitação por recirculação do gás presente no interior do tanque, que é aspirado, comprimido e injetado através de lanças distribuídas, estrategicamente, pela superfície do tanque de forma a incrementar a eficiência da agitação da suspensão.

2.3.3.2 Digestores anaeróbios

Os digestores têm um volume bruto de 2500 m³ cada, no entanto, é estabelecido um volume útil aproximado a 2000 m³ para suspensão e 500 m³ para a formação e retenção temporária do biogás.

Os digestores anaeróbios da Suldouro são digestores de alta carga, cuja taxa normal de digestão é significativamente superior aos digestores que funcionam em *batch*, em que a suspensão é aquecida e agitada, criando um ambiente uniforme incrementado a estabilidade e a eficiência.

Existem três processos contínuos na operação, conforme os representados na Figura 8, que ditam a eficiência da digestão anaeróbia esses baseiam-se na alimentação aos digestores, a recirculação da suspensão e a agitação da suspensão. A suspensão é agitada pela recirculação de biogás, aquecida pelo recurso a permutadores de calor e a alimentação é efetuada através da bombagem de suspensão retida no tanque de suspensão.

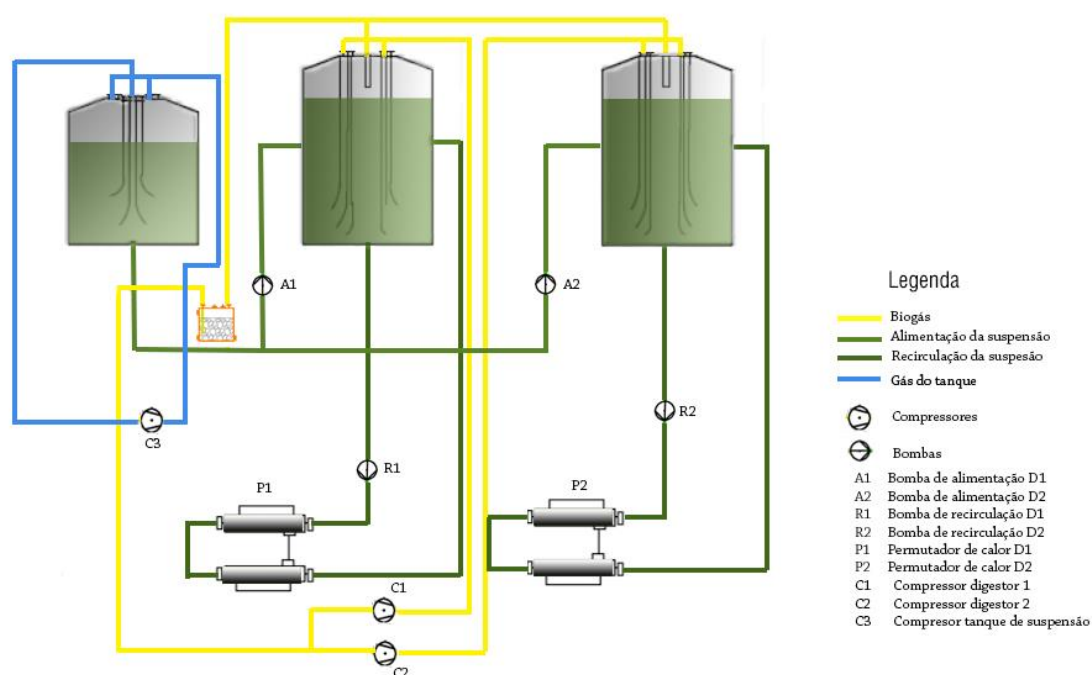


Figura 8 – Esquema dos digestores e sistemas de alimentação, recirculação e agitação

2.3.3.2.1 Alimentação aos digestores

A alimentação de suspensão orgânica aos digestores tem um elevado impacto na eficiência do sistema, uma vez que falhas neste critério registam grandes quebras na produção de biogás. A alimentação uniforme é muito importante para o desempenho da digestão anaeróbia, a suspensão orgânica deve ser alimentada continuamente ou a intervalos regulares para ajudar a manter as condições de estado estacionário no digestor e reduzir perturbações, especialmente importante para as bactérias metanogénicas sensíveis.^[10]

A alimentação aos digestores é um dos fatores preponderantes da digestão anaeróbia, dado que é partir desta atividade que é garantido a introdução de orgânicos biodegradáveis a ser degradados para produção de biogás. Apesar da suspensão com matéria orgânica contida dentro do digestor, a estabilidade da produção é garantida pela introdução de matéria orgânica facilmente biodegradável, como celulosas e glicoses. Com a monitorização, em tempo real, dos caudais de alimentação de suspensão é perceptível o efeito exercido sobre a produção de biogás.

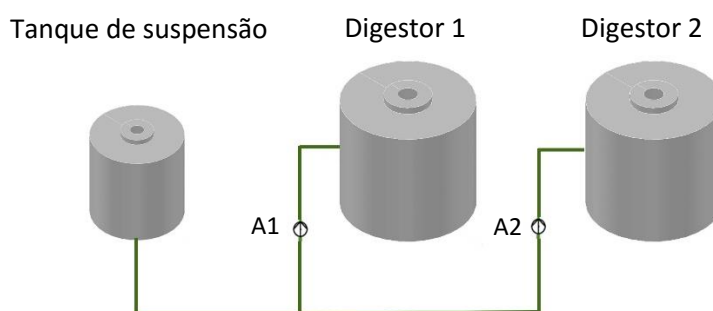


Figura 9 – Esquema do Sistema de alimentação da Suldouro

A alimentação de suspensão, em via húmida, aos digestores é garantida pelo recurso a um sistema de bombagem individualizado e conforme o representado na Figura 9, a suspensão retida e maturada é bombeada a partir de um primeiro tanque, tanque de suspensão orgânica, e introduzida nos respetivos digestores.

A estabilidade do caudal é importante para o desempenho da digestão, o caudal definido é de $3.1 \text{ m}^3 \text{ suspensão} \cdot \text{hora}^{-1}$ de forma a perfazer 75 m^3 totais suspensão orgânica por digestor durante um período de 24 horas. Devido a instabilidade das bombas de alimentação, este caudal varia ao

longo do dia, para tal estão registados os desvios padrão de forma a entender as variações existentes. Os desvios padrão foram obtidos a partir do software de monitorização da CVO para o período de 24 horas.

2.3.3.2.2 Recirculação da suspensão

O sistema de recirculação de suspensão (Figura 10) é efetivamente um dos sistemas chave no processo de digestão, uma vez que é através deste sistema que é garantida a estabilidade térmica aos digestores.

A suspensão residente no interior dos digestores é continuamente recirculada pelas tubagens representadas na Figura 11 e aquecida num permutador de calor, representado na Figura 12, forma eficaz para manter a temperatura na gama mesófila (35-38°) criando estabilidade térmica para populações microbiológicas. A temperatura é controlada no *software* de operação da central por um operador responsável, pela definição dos *set points* de temperatura dos permutadores.

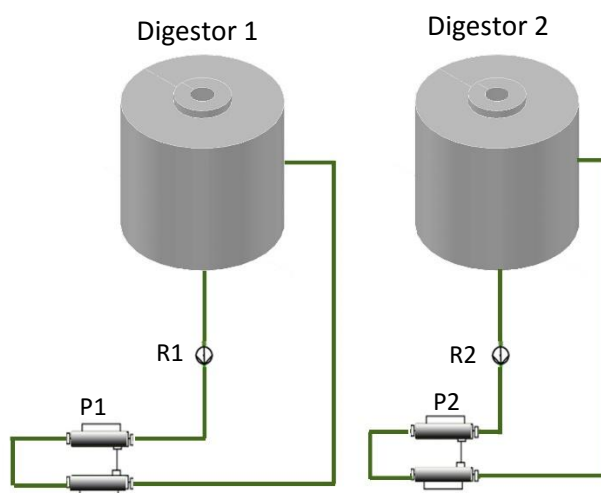


Figura 10 – Representação do Sistema de recirculação e aquecimento da suspensão

O permutador de calor responsável pelo aquecimento da suspensão (Figura 12) está acoplado a um sistema fechado de água. A água deste sistema é aquecida pelo aproveitamento da energia em forma de calor gerado pelos motores de combustão interna. A temperatura geralmente é regularizada para a gama mesófila, operando a temperaturas entre os 37° - 38° C, tendo em conta que a instalação foi dimensionada para operar nestas condições de temperatura e pela garantia da estabilidade na produção de biogás.



Figura 11 – Tubagens da introdução de suspensão



Figura 12 – Permutador de calor de aquecimento de lamas

2.3.3.2.3 Agitação da suspensão

O processo é fundamental para a produção de biogás uma vez que garante a homogeneização, evitando a floculação e estratificação da suspensão. A floculação da suspensão, cria camadas à superfície que funcionam como barreiras inibindo a passagem de biogás para o volume destinado à atmosfera criada no digestor registando-se grandes quebras na produção.

De forma a evitar a floculação, a Suldouro tem um sistema de agitação (Figura 13) classificado como um dos mais eficazes na homogeneização da suspensão, a agitação é garantida como recurso à aspiração e compressão (Figura 14) do biogás e recirculado para os digestores com recurso a lanças que distribuem o fluido pelo digestor, garantindo a homogeneização da suspensão. Embora a agitação seja garantida, a valorização do biogás é retardada pelo efeito do tempo de permanência do biogás no digestor. O biogás em excesso à agitação é encaminhado para o gasómetro para valorização energética

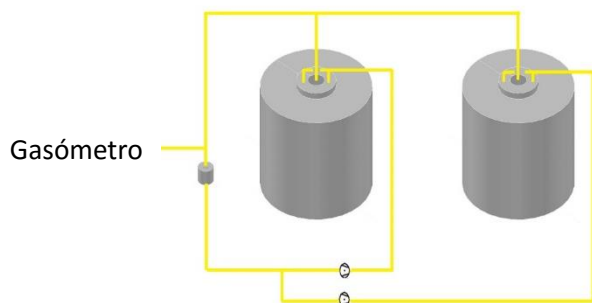


Figura 13 - Representação do percurso do biogás



Figura 14- Compressores de biogás

Um dos grandes problemas na produção de biogás por digestão anaeróbia é a formação de ácido sulfídrico, entre as várias formas de reduzir a concentração deste no biogás, uma delas é a introdução de oxigénio no biogás. O Sistema de agitação dos digestores funciona como intermediário na introdução de oxigénio. Um caudal entre 2 e 5 m³ O₂/hora é introduzido no sistema de agitação para inibir a produção de H₂S.

Embora este seja um procedimento eficiente na redução de sulfídricos é também um contrassenso ao conceito de digestão anaeróbia. A introdução de oxigénio induz a formação de bactérias aeróbias, que na presença de oxigénio se podem sobrepor às bactérias metanogénicas reduzindo a eficiência da degradação da matéria orgânica.

2.3.3.3 Produção de biogás na CVO

A produção de biogás é um dos parâmetros com maior importância na Suldouro, pelo facto de valorizar a fração orgânica biodegradável contida nos RSU para produzir energia elétrica de origem renovável com o objetivo de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e contruir uma sociedade energeticamente sustentável. Com base neste critério a Suldouro propôs a análise de todos os parâmetros envolvidos desde o processamento do resíduo no tratamento hidromecânico até ao tratamento biológico de forma a potenciar a produção de biogás.

A produção de biogás está diretamente correlacionada com a qualidade do resíduo recebido, com a operação do tratamento hidromecânico e as condições de operação dos reatores no tratamento biológico. Com base na monitorização dos processos da CVO foi possível reunir e desenvolver um conjunto de medidas e critérios de operação que, efetivamente permitiram potenciar e estabilizar a produção de biogás na central.

O biogás gerado nas CVO é um gás, significativamente mais rico em metano, e com menor suscetibilidade á presença de oxigénio. Condições estáveis de temperatura, pH e a introdução de carga orgânica sistematicamente, permite a produção de gás com uma composição com elevado teor de metano garantindo propriedades energética superiores. A Tabela 1 representa a composição típica do biogás, baseado na recolha de amostras, da central de valorização orgânica da Suldouro

Composição típica biogás CVO	
CH ₄ (%v)	62-66
CO ₂ (%v)	34-38
O ₂ (%v)	0-0,3
H ₂ S (ppm)	0-1500
CO (ppm)	0

Tabela 1- composição típica do biogás da CVO Suldouro

2.4 Aterro Sanitário

A Suldouro começou a explorar o aterro sanitário (Figura 15) em 1999, da implementação do aterro era exclusivamente para a deposição de resíduos não perigosos gerados nos Municípios de Vila Nova de Gaia e Sta. Maria da Feira. O aterro tem uma capacidade da instalação de $2,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, de acordo com a licença em volumetria.



Figura 15 – Aterro de Sermonde (2012) fonte: Suldouro

A estimativa do potencial gerador de biogás do aterro de Sermonde é aproximadamente de 120 m^3 biogás/ ton RSU depositado. O valor é estimado, tendo em conta o biogás extraído até 2014 e a quantidade de RSU depositado até à mesma data. Este rendimento não depende exclusivamente da quantidade de resíduos depositados, depende, de todo um trabalho conseguido e conhecimento adquirido, para desenvolver um sistema de captação e drenagem de gás de aterro e condensados, que associado à monitorização constante incrementam a produção de forma a tornar a Suldouro numa instalação de produção de energia. A Tabela 2 representa a composição típica do biogás do aterro de Sermonde, com base nas amostras obtidas durante o período de estágio.

Tabela 2 – Composição típica gás de aterro.

Composição típica biogás de Aterro	
CH ₄ (%v)	48-51
CO ₂ (%v)	34-38
O ₂ (%v)	0-1,4
H ₂ S (ppm)	0-100
CO (ppm)	0

2.4.1 Sistema de captação e drenagem de gás de aterro

O sistema de captação gás de aterro da Suldouro apresenta uma configuração deferente dos sistemas de drenagem tradicionais. Dos típicos sistemas de furo verticais e horizontais utilizados em aterros, na Suldouro são implementados como medida de recuperação áreas aparentemente inativas. Os sistemas de furos verticais, após a deposição e selagem dos alvéolos verificam-se produtivos, embora, limitado pela acumulação de condensados e lixiviados que compactam o resíduo, reduzindo a permeabilidade, impedindo a drenagem do biogás.

A Suldouro desenvolveu um sistema de drenos (Figura 17) , dispostos na diagonal, atribuindo a inclinação adequada ao local, drenando os fluidos resultantes em direções opostas. Este sistema permite drenar os condensados por escoamento gravítico para a linha situada nas zonas mais baixas do aterro, gás é encaminhado para a central de valorização energética.



Figura 16 – Válvula de regulação.

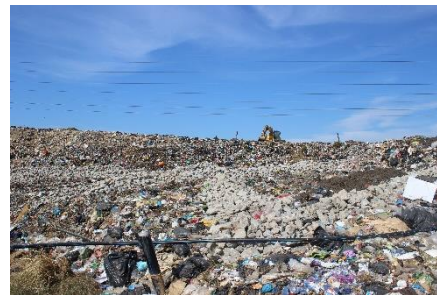


Figura 17 – Sistema de drenos.

A composição e extração de biogás em aterro está fortemente dependente do processo de monitorização e regularização dos drenos e poços, através de válvulas de regulação (Figura 16) e das purgas de condensados. Em aterro, os drenos e poços abrangem um volume definido como reator

biológico, os reatores não apresentam uma medida padrão, logo parte daqui a exigência de regulação periódica da subpressão dos drenos. A subpressão ou depressão no reator é provocada pelos ventiladores e pelos motores na central de valorização energética. O aumento da subpressão é um procedimento utilizado para extrair maior quantidade de biogás, ou seja a subpressão exigida sobre o reator será superior para abranger um maior volume.

Embora este seja um procedimento utilizado e com resultados significativos em termos de extração. Não obstante, o aumento da pressão exercida sobre o reator biológico estimula a entrada de oxigénio no reator pela suscetibilidade criada pela permeabilidade dos solos ou em caso das zonas de taludes, provocada pela fragilidade na tela.

A monitorização das purgas é outro aspeto importante, pois a acumulação de condensados na linha reduz a área da secção, limitando o transporte de biogás para os motores e em casos de elevada acumulação e fruto da depressão, a secção é momentaneamente obstruída causando intermitências de caudal de biogás à entrada dos motores provocando paragens dos equipamentos.

2.5 Central de valorização energética

A Suldouro iniciou a atividade de produção de energia em 2004 instalando o primeiro motor GE Jenbacher com 1048 kWe de potência. Com a atitude de evoluir no setor, e com técnicas de captação e drenagem de biogás desenvolvidas e com resultados que ascendiam para as necessidades de incrementar a potência instalada e extrair efetivamente o biogás gerado. Como o demonstrado na linha do tempo, a Suldouro foi adquirindo equipamentos para conversão de biogás e mais recentemente para o aproveitamento dos gases de escape através dos ORC (Figura 18).

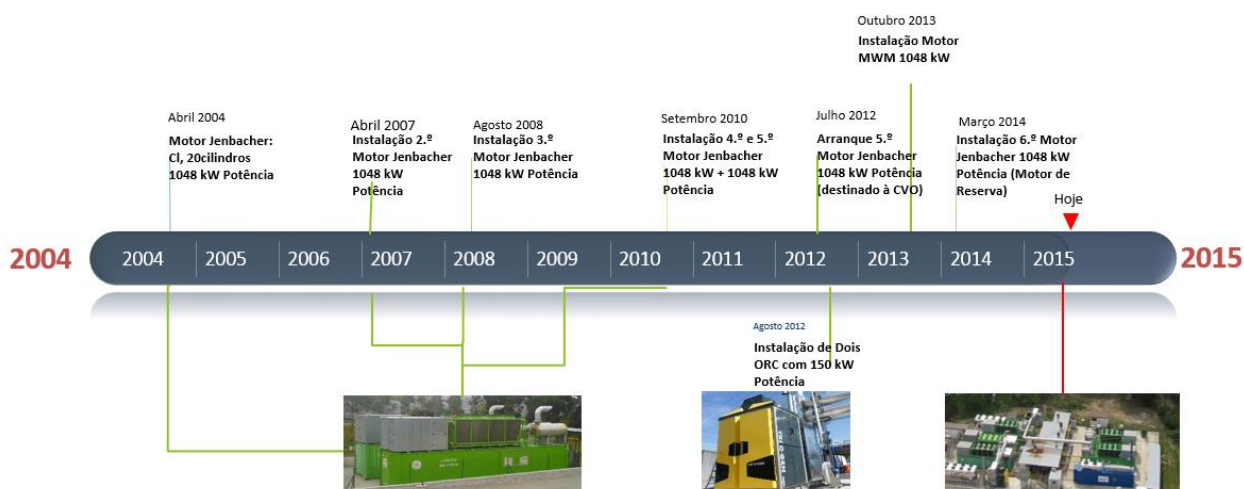


Figura 18 – Evolução da aquisição de equipamentos de valorização energética (Fonte: Suldouro).

A central de valorização energética tem aproximadamente 7,6 MWe de potência instalada, contam 6 motores GE Jenbacher de 1048 kWe potência, 1 motor MWM de 1048 kWe de potência, utilizado como reserva, e 2 ORC com 160 kWe, constituindo a mais complexa central de valorização energética do biogás em Portugal.

Para além do sistema de valorização energética existem dois outros sistemas associados à central, nomeadamente o sistema de secagem do biogás e o sistema de ventilação/compressão, estes dois sistemas são responsáveis por parte da qualidade e da quantidade de biogás a ser introduzido nos motores.

Em termos de valorização energética do biogás a Suldouro utiliza os motores de combustão interna acoplados a um gerador para a produção de energia elétrica e ainda aproveita a energia em forma de calor, ao captar os gases de escape e direcioná-los para os ORC que utiliza o fluido de trabalho, o tolueno, cujo fluido é expandido acionando uma turbina para gerar energia elétrica.

Outra forma de aproveitar o calor é utilizar a água de refrigeração dos motores para aquecer, por permutação, a água de um circuito fechado complementar, satisfazendo as necessidades de aquecimento dos serviços administrativos, serviços sanitários e o principal para o aquecimento do permutador de calor responsável pela manutenção da temperatura dentro dos digestores.

2.5.1 Remoção de humidade do biogás

É um sistema desenvolvido e implementado pela Suldouro e consiste em utilizar um permutador de calor integrado nas linhas de biogás (Figura 19), arrefecido pelo mesmo sistema de água de arrefecimento dos motores (Figura 20). Este sistema confere a condensação das partículas de água existentes no biogás, reduzindo o teor de humidade, evitando a acumulação das partículas de H_2O nos *intercoolers*. O efeito da condensação confere a redução da concentração de H_2S por condensação. Compostos como o H_2S em reação com a água podem levar a formação de ácido, corroendo os componentes do motor.



Figura 19 – Permutador de calor tubular nas linhas de biogás.



Figura 20- Sistema de arrefecimento dos motores a água.

2.5.2 Sistema de ventilação

A CVE da Suldouro tem um sistema de ventilação associado a cada um dos motores. Cada sistema é composto por um ventilador (Figura 21) e um vaso de expansão (Figura 22). Este sistema é responsável pela aspiração e compressão do biogás, efetivamente é responsável pela extração do gás de aterro.

A variação da depressão exercida no aterro é controlada pela potência dos motores, geralmente a pressão dos equipamentos destinados à extração de gás de aterro pode variar entre os 130 e 170 mbar para os motores de ciclo Otto a operar com potências entre os 800 e os 1000 kW.

A pressão exercida sobre o aterro é mantida entre os 135 e os 145 mbar de forma a abranger um determinado volume dos reatores, embora seja necessário efetuar a respetiva regulação dos drenos e poços de maneira a extrair biogás sem que haja a contaminação das culturas de microrganismos com a presença de oxigénio, deteriorando a qualidade e, consequentemente, a quantidade de biogás.



Figura 21 – Ventilador do sistema de aspiração.



Figura 22 – Sistema de aspiração e vaso de expansão.

2.5.3 Valorização energética de biogás

A central de valorização energética da Suldouro é composta por sete motores de ciclo Otto, dos quais seis motores são da GE Jenbacher J329 GS-LL acoplados a geradores Stamford PE 734 C2 têm uma potência de 1048 kWe, ainda tem um motor de reserva da MWM de 1048 kW de potência. São motores com ciclos a 4 tempos refrigerado a água de 20 cilindros (70°) e com compressão de mistura com turbocompressor dos gases de escape.

Os motores da GE Jenbacher (Figura 23 e 24) funcionam de acordo com o processo LEANOX, que apresenta o desenvolvimento do princípio do motor com mistura pobre. Este sistema garante uma correta relação entre o ar e o gás para todas as condições operacionais, é um sistema desenvolvido pela Jenbacher para maximizar a eficiência energética e minimizar as emissões de NOx durante o processo combustão no motor.



Figura 23 – Unidade contentorizada dos motores.

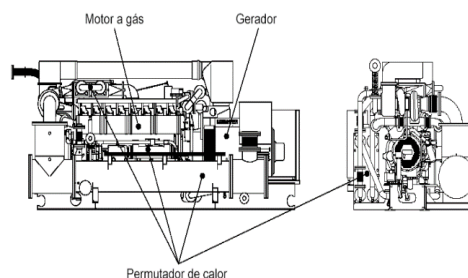


Figura 24 – Esquema do motor Jenbacher. [8]

Os motores GE devem ser apenas alimentados com gases, que nas condições em que se encontram fora do motor não constituam perigo de ignição. Ao contrário dos combustíveis a gasolina ou a gasóleo, os combustíveis a gás não têm em geral uma classificação ou especificação rígida.

Os sistemas de motores GE Jenbacher são completamente adequados às composições do gás propulsor por lei. Uma composição de gás que se desvie ou que ultrapasse os valores limite respeitantes ao gás propulsor tem geralmente um efeito desvantajoso no funcionamento do motor.

Segundo a *GE Jenbacher*, e como é demonstrado na Figura 25, todo o biogás introduzido nos motores é convertido em energia mecânica (42%), energia térmica (58%), contudo cerca de 40% da energia mecânica é útil para produção de energia elétrica e 50% é útil para energia térmica, os restantes 10% são traduzidos em perdas.

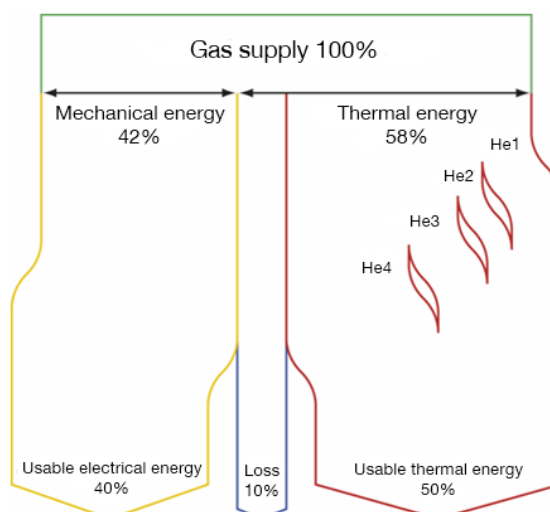


Figura 25 – Rendimento do motor GE Jenbacher na conversão de energia [<https://www.clarke-energy.com/gas-engines/>].

2.5.4 Valorização energética dos gases de exaustão no processo ORC

A Suldouro em 2012 aderiu à tecnologia da Tri-O-Gen (figura 26), que utiliza o ciclo Rankine orgânico para gerar energia elétrica a partir dos gases de escape dos motores, incrementando o rendimento instalação na produção de energia elétrica.

A partir dos ORC (Figura 26) é possível converter o calor produzido e emitido sobre a forma de gases de escape, provenientes dos motores, valorizando-os como fonte térmica para o aquecimento

do fluido de trabalho, neste caso específico, o tolueno, uma vez que este evapora a baixas temperaturas expandindo o fluido para acionar uma turbina e produzir energia elétrica.



Figura 26 – TRIOGEN – ORC (Organic Rankine Cycle).

Na central de valorização energética estão instalados dois ORC que convertem o calor dos gases de escape de quatro motores. Cada ORC tem a capacidade de admitir gases de exaustão de dois motores.

Segundo o fornecedor contêm uma potência térmica entre 450 e 900 kW_{th}. Os rendimentos indicados pelos fornecedores de forma a caracterizar a performance dos ORC definem que gera de potência elétrica (bruta) entre 60-165 kW_e (rendimento 13-18%) e uma potência elétrica (liquida) entre 50-155 kW_e (rendimento 11-17,5%). Os rendimentos explanados anteriormente referem-se essencialmente ao rendimento obtido pelo ciclo do tolueno. O ORC funciona com base no ciclo de Rankine orgânico de acordo com o demonstrado na Figura 27. ^[9]

Os ORC admitem um caudal de gases de escape, este caudal funciona como fonte térmica, entrando no sistema a uma temperatura > 350°C, aquecendo um evaporador, fornecendo uma potência térmica dentro do intervalo de 450 -900 kW_{th} ao fluido de trabalho que funciona um sistema independente e é responsável pela geração de energia elétrica. ^[9]

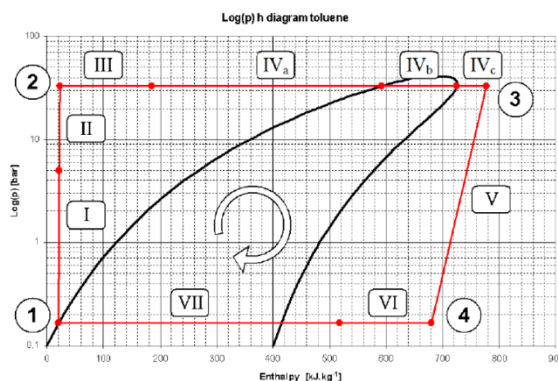


Figura 27 – Diagrama Ciclo Orgânico de Rankine..^[9]

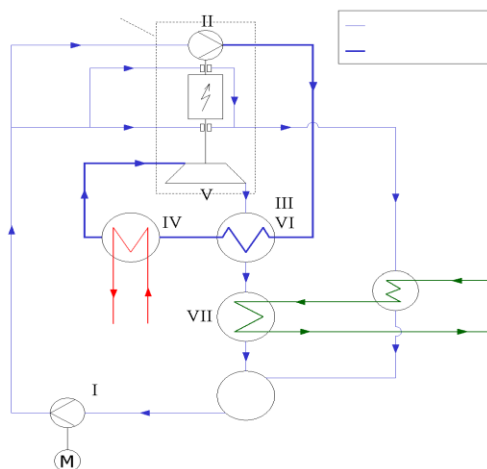


Figura 28 – Esquema do processo do Ciclo Orgânico de Rankine..^[9]

O esquema do processo (Figura 28) pretende explicar e situar o percurso do fluido de trabalho nos diferentes componentes. O fluido de trabalho é bombeado a partir do reservatório, através de uma bomba de pré-alimentação elétrica (I), para a bomba principal e para os rolamentos do HTG (High Speed Turbogenerator) ou turbogerador.^[9] A bomba principal (II), componente do HTG, bombeia o fluido para o evaporador e aumenta a pressão de trabalho, no recuperador (III, VI), o fluido de trabalho pressurizado, em estado de vapor, que sai da turbina, é utilizado para o aquecimento de trabalho liquefeito que vai para o evaporador.^[9] No evaporador (IV), o fluido de trabalho, evapora em três passos: Aquecer (IVa), Evaporar (IVb) e sobreaquecer (IVc). O fluido é encaminhado para a turbina (V), onde o tolueno em estado gasoso é expandido para acionar a turbina. Desta forma é gerada energia elétrica no gerador, que por sua vez aciona a bomba principal. Depois de sair do recuperador (VI), o fluido de trabalho entra no condensador (VII), onde é arrefecido até à condição de líquido saturado e volta a entrar no reservatório.^[9]

Capítulo 3 - Monitorização de um Sistema de valorização energética do biogás

Em âmbito de estágio, procedeu-se à monitorização, segundo o esquema representado na Figura 29, dois sistemas para produção de biogás e um sistema de valorização energética do mesmo.

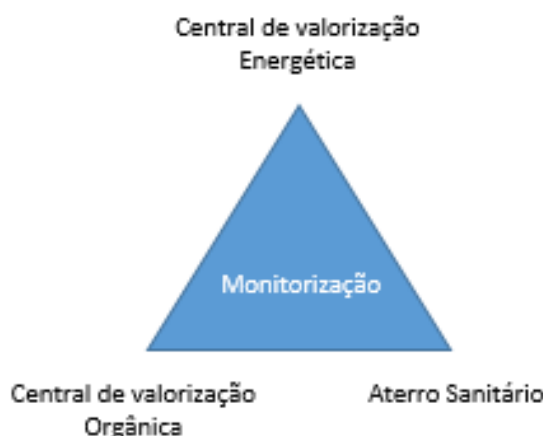


Figura 29 – Diagrama de monitorização.

O maior ênfase em termos de monitorização residuiu sobre a central de valorização orgânica e a necessidade de a otimizar, em termos de produção de biogás. Para tal foram monitorizados parâmetros de operação e indicadores de estabilidade de digestão anaeróbia e a progressão da produção de biogás. Para potenciar a produção de biogás na CVO foram aplicadas três medidas de otimização, a primeira consistiu na estabilidade do volume de suspensão alimentada para garantir um tempo de retenção hidráulico de 27 dias e alimentação continua aos digestores para operar em alta carga, condições nas quais os digestores anaeróbios são mais eficientes. A segunda consistiu no corte de oxigénio nos digestores com o objetivo criar condições de anaerobiose e incrementar o crescimento de bactérias metanogénicas. A terceira teve como objetivo regular o tanque de suspensão pelo decréscimo da concentração de oxigénio e pela regulação do tempo de retenção hidráulico para operar o tratamento biológico em duas fases. A primeira fase ocorre no tanque de suspensão onde são estabelecidas condições de pH e temperatura, concentração de oxigénio e retenção da suspensão para o desenvolvimento das primeiras fases da digestão anaeróbia. A segunda fase ocorre já nos digestores onde estão criadas condições para que ocorra a ultima fase da digestão anaeróbia, a metanogénese.

Em termos de monitorização de aterro, focou-se principalmente na monitorização de experiencias de reabilitação de drenos e extração de biogás, em quantidade e composição. Foi

também catalogado um conjunto de drenos e poços existentes no aterro e delimitado num mapa as áreas mais produtivas atualmente.

Quanto à central de valorização energética, com principal enfoque a produção de eletricidade, foram monitorizados parâmetros como caudais e composição de biogás admitidos pelos motores para conversão de energia elétrica, cujo objetivo é determinar o desempenho dos equipamentos de conversão de energia e traçado o perfil de produção de energia elétrica.

3.1. Monitorização da central de valorização orgânica

A monitorização e controlo representam um papel preponderante na otimização do sistema. A maximização da rentabilidade e eficiência do processo de digestão anaeróbia depende, fortemente, de uma análise sucinta da globalidade do processo. A operação revela-se influente nos indicadores de estabilidade e no rendimento da digestão anaeróbia.

O constante controlo dos parâmetros de operação e o controlo da estabilidade dos parâmetros no tratamento biológico estão diretamente correlacionados com a produtividade e a maximização do rendimento na produção de biogás. Como forma de otimizar e estabilizar a produção de biogás na central de valorização orgânica da Suldouro foram monitorizados os diversos indicadores de controlo e de estabilidade, de forma a estabelecer uma correlação exata entre a operacionalidade do processo com a produção de biogás.

3.1.1 Monitorização dos indicadores de estabilidade no tratamento biológico

Os indicadores de estabilidade de digestão anaeróbia permitem a estabelecer uma análise comportamental para diversas condições de operação, e encontrar possíveis fatores inibitórios no sistema e criar um perfil temporal registando as diversas variações ocorridas.

Foram realizados um conjunto de amostras regendo-se sobre os métodos descritos segundo os procedimentos de laboratório (Anexo I). Estes procedimentos assentaram sobre a monitorização dos indicadores como pH, alcalinidade e AGV para determinar a capacidade tampão, Sólidos totais e Sólidos voláteis e azoto amoniacal (NH_4^+), nos digestores. Posteriormente, quando perceptível a importância do tanque de suspensão na digestão anaeróbia, iniciou-se a monitorização do pH, temperatura e sólidos totais e sólidos voláteis, desse mesmo tanque.

A estabilidade destes indicadores dependem da estabilidade da operação dos equipamentos e pela operacionalidade dos mesmos, variações no caudal de alimentação de suspensão, carga orgânica, tempos de retenção, o fator alimentação-desidratação e o regime de alimentação, fatores cujo comportamento não é linear, e efetivamente têm repercussões na estabilidade do processo de digestão anaeróbia.

3.1.1.1 pH e temperatura

A medição do pH e da temperatura é um procedimento diário, a medição da relação alcalinidade/ acidez, e temperatura são indicadores de condição de estabelecimento de microrganismos metanogénicos num determinado âmbito.^[10] Estes indicadores são avaliados, em dois pontos do tratamento biológico, primeiro no tanque de suspensão e segundo nos digestores.

O primeiro é medido com o intuito de obter um pH estabilizado na ordem dos 5- 5,2 devendo-se às condições ótimas de estabelecimento de bactérias acetanogénicas.

O pH dos digestores é medido, pois a variação na concentração de protões, retarda o processo de conversão e degradação da matéria orgânica por inibição no crescimento microbiano, logo variações acentuadas afeta a atividade enzimática, levado à formação de ácidos gordos voláteis, azoto amoniacal e variações na alcalinidade.^[10]

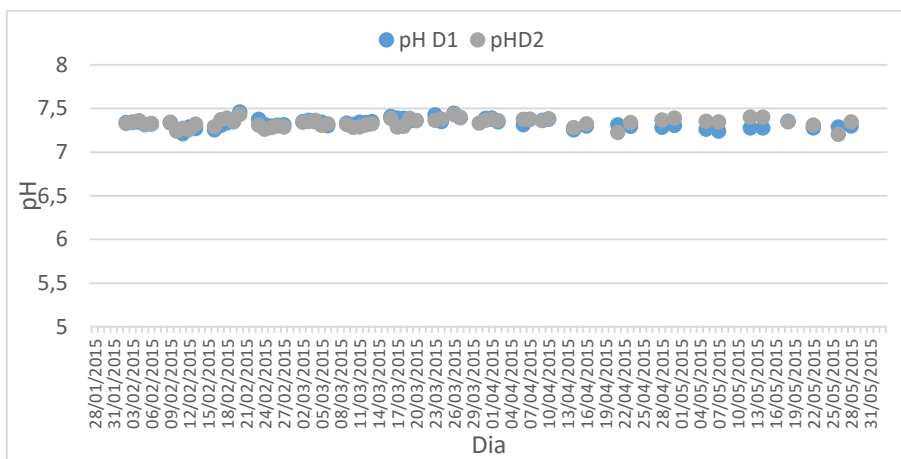


Figura 30 - Perfil de variação do pH nos digestores.

A Figura 30 representa variação do pH durante o período de quatro meses e permite comparar a variação existente antes e depois da aplicação das medidas de otimização.

Em termos globais, os valores de pH estão dentro do intervalo ótimo para o crescimento de bactérias metanogénicas, embora a partir de abril quando foram implementadas as medidas de otimização, o pH médio tenha descido de um intervalo de 7,3 - 7,4 para um intervalo médio de 7,2-7,3. Este parâmetro revelou-se ser extremamente estável aos diferentes modos de operação.

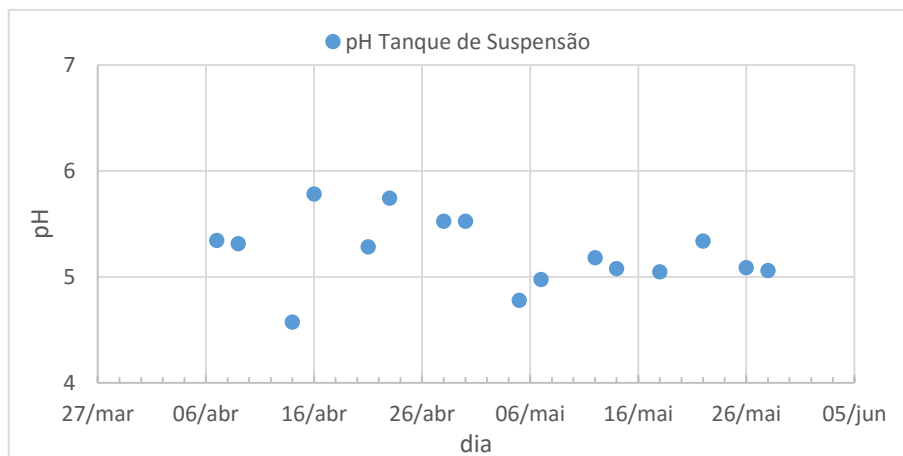


Figura 31 - Perfil de variação do pH no tanque de suspensão.

O pH no tanque de suspensão, que normalmente operava na gama dos 5,5 e 5,8 e atualmente estabilizando-se na gama dos 5 – 5,2, como o demonstrado na Figura 31. A correção do pH no tanque de suspensão para os valores pretendidos ocorreu pela regulação do teor de oxigénio e pela estabilidade nos tempos de retenção.

Quanto à temperatura de operação dos digestores, esta, como referido na descrição da instalação, é garantida pela recirculação da suspensão aquecida num permutador de calor e novamente introduzida por condutas isoladas termicamente para evitar perdas no transporte. A temperatura dos digestores é regulada para como forma de criar condições para o estabelecimento de bactérias metanogénicas da gama mesófila (35-38°C), no anexo II as tabelas respeitantes à monitorização dos parâmetros de operação demonstram os balanços de temperatura praticados.

3.1.1.2 Alcalinidade e Ácidos gordos voláteis

Os AGV são um dos produtos intermediários mais importantes no processo de digestão anaeróbia, onde são degradados por bactérias acetanogénicas de redução de protões em associação com bactérias consumidoras de hidrogénio. ^[10] A produção de AGV pode ser tóxica para os microrganismos, principalmente para os metanogénicos para concentrações de 6,7-9 mol/m³. O aumento das concentrações pode resultar da acumulação durante desequilíbrios no processo, causado pela variação da temperatura, sobrealimentação, compostos tóxicos, entre outros fatores. Por vezes as metanogénicas não estão preparadas para remover o hidrogénio e os ácidos gordos voláteis rápido o suficiente. ^[10] Como resultado da acumulação de ácidos acontece uma redução de pH para valores tão baixos que pode inibir as fases de hidrólise/acetanogénese. A toxicidade acontece devido ao aumento de AGV na forma indissociada. Estes conseguem passar facilmente pela membrana da célula onde são dissociados e, consequentemente causa uma redução do pH pela perturbação na homeostasia. O elevado aumento das concentrações AGV num digestor anaeróbio de alimentação descontínua causam efeitos negativos nas diferentes fases metabólicas da hidrólise, acidogénese e produção de biogás. ^[10]

A alcalinidade representa a capacidade do digestor em neutralizar os ácidos formados durante a digestão anaeróbia, sendo associada essa capacidade à suspensão residente ou à suspensão introduzida. A acumulação de AGV no digestor retrata a produção e o consumo destes pela parte dos microrganismos acidogénicos, acetanogénicos e metanogénicos. Os valores de AGV e Alcalinidade são expressos em ácido acético e equivalentes de bicarbonato de cálcio, medido com base nas técnicas de titulação definidas nos procedimentos da Suldouro.

Determinar estes valores incide sobre a necessidade de calcular a rácio AGV/alcalinidade ou capacidade tampão do sistema, sendo um indicador de proporção entre os componentes que interferem no pH.

A Figura 32 representa a alcalinidade em g ácido acético/ g equivalentes de bicarbonato de cálcio ao longo do período de 4 meses. Este é um parâmetro de controlo da estabilidade obrigatório, tendo em conta, que este reflete a capacidade do digestor neutralizar ácidos formados durante a digestão anaeróbia.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

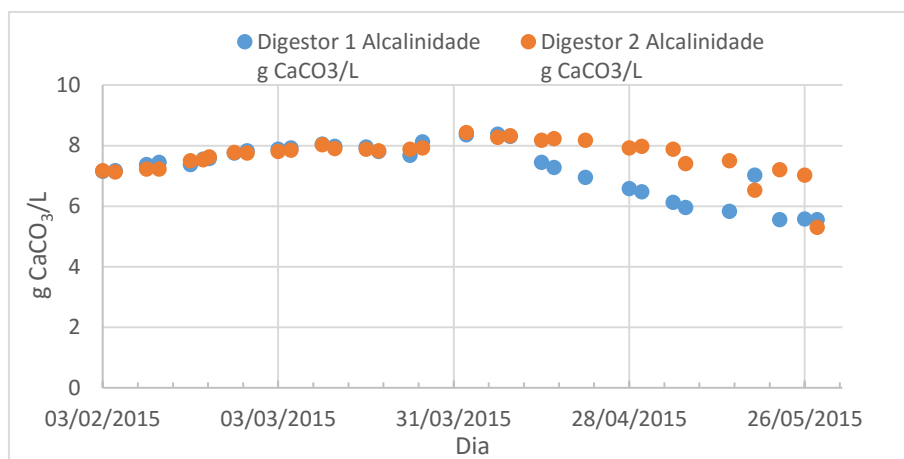


Figura 32 - Perfil de resultados de Alcalinidade nos Digestores.

Durante o período de medições registaram-se valores entre 7 e 9 g CaCO₃/L entre o mês de Fevereiro e meio do mês de abril. Consequência das medidas de otimização implementadas registou-se um decréscimo na capacidade dos digestores neutralizarem os ácidos formados, embora mais acentuado no digestor 1. Estima-se e justifica-se a ocorrência deste fenómeno, devido à ausência de oxigénio no digestor 1 e a introdução de suspensão com valores de pH mais baixos.

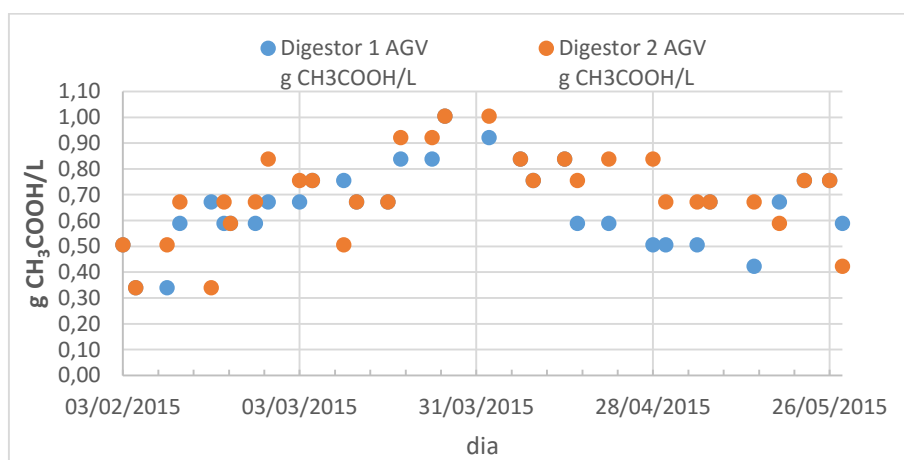


Figura 33 - Perfil AGV nos Digestores.

A Figura 33 representa a variação da acumulação de ácidos gordos nos digestores, em g equivalentes de ácido acético/L. Com base no perfil de AGV registado, denota-se uma elevada concentração de AGV durante o mês de Março, efetivamente, o mês mais baixo em termos de produção de biogás. Os ácidos gordos voláteis em elevadas concentrações têm efeitos inibitórios para a digestão anaeróbia, podendo atingir graus de inibição na ordem dos 50%.^[10] Ao aumento da

concentração no mês de março associa-se a irregularidade de alimentação da suspensão, ao regime de alimentação praticado e ao regime de desidratação.

O decréscimo da concentração de AGV nos digestores começou por se notar, ao fim de cinco dias da alteração do regime de alimentação. Até ao dia 27 de março a alimentação verificava-se instável, em regime descontínuo e em intervalos irregulares. No dia 28 de março, o regime de alimentação passou a ser contínuo, com caudais regulares compensando o efeito alimentação – desidratação. Portanto, estima-se que a regularidade, estabilidade da alimentação, e o tipo de regime praticado, tem efeitos benéficos nos parâmetros de estabilidade, tornado o sistema menos suscetível à concentração de AGV nos digestores.

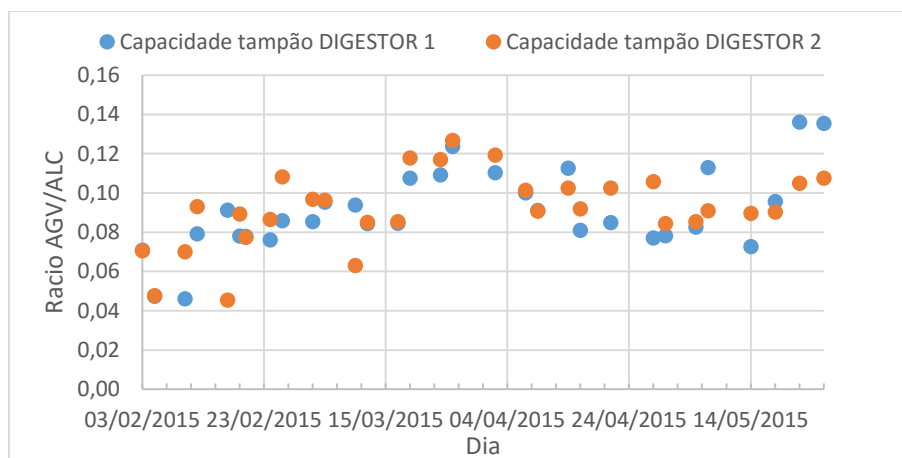


Figura 34 - Perfil Capacidade Tampão nos Digestores.

Com base nas concentrações da alcalinidade e nas concentrações da AGV nos digestores, é calculado o rácio da capacidade tampão. Segundo o estipulado nos procedimentos de laboratório, os valores do rácio da capacidade tampão (Figura 34) deve-se encontrar num intervalo em 0,04 e 0,06, como indicador de máxima produtividade. No entanto, os registos de maior produtividade foram alcançados para rácios entre os 0,07 e os 0,09.

3.1.1.3 Sólidos totais e sólidos voláteis

Os sólidos voláteis representam a porção dos materiais sólidos totais que podem ser digeridos, enquanto os restantes sólidos são fixos. Os sólidos fixos são uma porção de sólidos totais que não orgânicos. A taxa de carga real depende dos tipos de resíduos que são alimentados para o

digestor, estes vão determinar o nível de atividade bioquímica que irá ocorrer no digestor. Grandes variações na composição do fluxo de entrada e nas cargas orgânicas, podem perturbar o equilíbrio entre a fermentação do ácido e a fase da metanogénese.^[10]

Em substratos solúveis facilmente degradáveis, como açúcares, amidos solúveis, proteínas e lípidos simples. As reações acidogénicas podem ocorrer mais rapidamente a altas cargas, podendo aumentar os ácidos gordos voláteis (AGV) e as concentrações de hidrogénio no reator e consequentemente diminuir o valor do pH.^[10] A taxa de admissão de matéria orgânica afeta a taxa de alimentos-a-microrganismos (taxa F/M). O sistema atinge o equilíbrio quando os substratos de alimentos e os microrganismos estão em equilíbrio^[10]

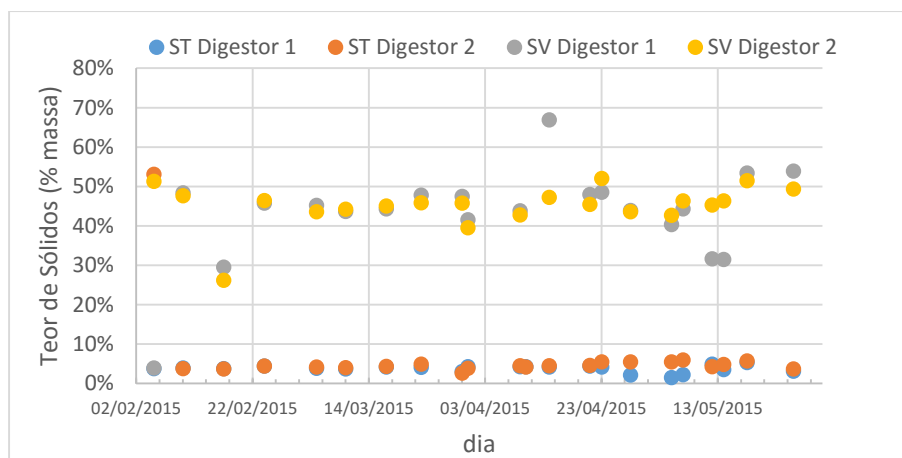


Figura 35 - Perfil Variação Sólidos totais e Sólidos Voláteis Digestores.

As medições dos sólidos totais e sólidos voláteis dos digestores são efetuadas duas vezes por semana de forma a obter a informação do conteúdo inerte e do conteúdo orgânico existente na suspensão. Com as medições e os registos efetuados permitiram estabelecer um perfil da variação do conteúdo de sólidos ao longo do tempo, conforme a Figura 35, e ter uma estimativa quanto taxa de degradação, pelo balanço de sólidos impregnado, através das medições do teor de sólidos nos tanque de suspensão e os sólidos contidos nos digestores.

A Figura 35 representa a variação dos sólidos totais e sólidos voláteis durante o período de 20 semanas dos digestores. O registo destes valores, esta associada à quantidade de material orgânico presente na suspensão dos digestores. Os teores de sólidos totais nos digestores devem-se encontrar na gama dos 4-5% massa e os sólidos totais na gama dos 50-65% massa, para associar a uma taxa de degradação de cerca de 50% em relação ao teor de sólidos impregnados.

Os resultados obtidos, comprovam o cumprimento dos requisitos definidos, embora seja denotada, que a partir de 20 de abril a 20 de Maio o teor de sólidos totais e voláteis no digestor 1 sofreu um decréscimo na ordem dos 50% massa em relação as amostras anteriores. A este decréscimo estima-se uma maior taxa de degradação da suspensão, dado que a partir deste período se registou um aumento na produção de biogás. Como forma de corrigir, submeteu-se os digestores a um sistema de *bypass* em quem foi efetuada uma mistura da suspensão, prática usual para equilibrar os níveis dos digestores pelo balanço de massas, para corrigir os teores de sólidos.

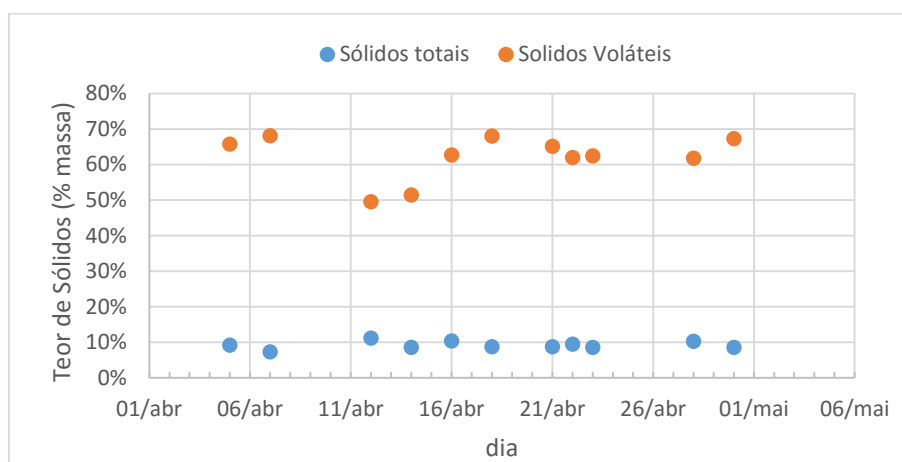


Figura 36 - Perfil de Variação de Sólidos totais e sólidos voláteis no tanque de Suspensão.

São também medidos o teor de sólidos totais e sólidos voláteis no tanque de suspensão (Figura 36), com o objetivo de determinar a carga orgânica introduzida nos digestores anaeróbios, a central da CVO opera com um teor de sólidos totais entre 8-10% e sólidos voláteis entre 55-65%, equivalente a 45 –68 Kg SV/m³ suspensão. O balanço entre os sólidos no tanque e nos digestores permite obter uma perspetiva da taxa de degradação existente e obter um rendimento de produção de biogás.

3.1.1.4 Azoto amoniacal (N-NH_4^+)

O amoníaco (NH_3) é um composto importante, com uma função significativa para o processo de digestão anaeróbia. É produzido durante a degradação da matéria azotada principalmente proteína e ureia. O amoníaco (NH_4) e o amoníaco livre (NH_3) são as duas formas predominantes da presença de azoto inorgânico. É indicado que o amoníaco livre é o mais tóxico de ambos, uma vez que consegue passar mais facilmente pela célula da membrana e para dentro da célula, causando um desequilíbrio de prótons e deficiência no potássio. ^[10]

A concentração de amoníaco livre geralmente depende de três parâmetros: concentração de amoníaco total, temperatura e pH. Um aumento da temperatura tem um efeito positivo na taxa de crescimento biológico, no entanto, também resulta no aumento da concentração de amoníaco livre. Um aumento de pH irá resultar num maior nível de toxicidade devido à mudança para maior taxa de conversão de amoníaco livre para ionizado. A instabilidade do processo poderá dar origem à formação de Ácidos gordos voláteis, originando uma redução do pH e consequentemente, uma quebra na produção de biogás. ^[10]

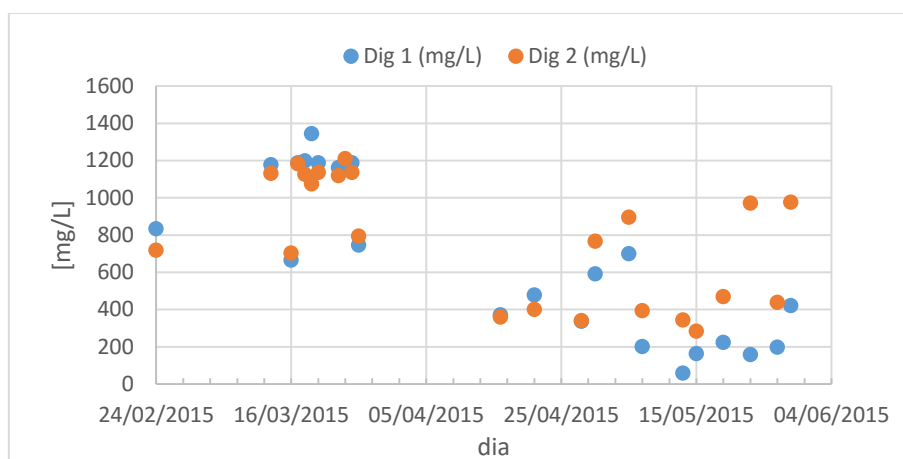


Figura 37 - Variação da concentração de azoto amoniacal na forma de NH_4^+ nos digestores.

A Figura 37 representa a variação da concentração de azoto amoniacal nos digestores, efetivamente foram registadas elevadas concentrações no mês de Março, consequentemente, um decréscimo abrupto da produção de biogás. Associa-se que a elevada concentração de azoto amoniacal está a elevada concentração de AGV no mesmo período de tempo, balanço negativo entre a Alimentação - desidratação e um processo de digestão mais lento e incompleto, o decréscimo da concentração de azoto amoniacal, esteve diretamente relacionado com o corte de oxigénio nos digestores e a estabilização da alimentação em regime contínuo.

A ausência de oxigénio e a estabilidade da alimentação de suspensão em regime contínuo de conferiram condições adequadas para o crescimento de bactérias metanogénicas. A taxa de crescimento de bactérias metanogénicas é superior em condições de anoxia, a alimentação de suspensão em regime contínuo reduz o choque no balanço de carga orgânica provocado pela descarga.

3.1.2 Monitorização dos parâmetros de operação

A Suldouro está equipada com um sistema de monitorização (Figura 38) de todos os processos mecânicos dos quais são dependentes a operação da central de Valorização Orgânica. A partir deste software da *BTA internacional*, foram monitorizados todos os processos envolvidos desde a produção de suspensão até a desidratação dos mesmos.

Embora todos os processos tenham sido analisados, foram destacados, a alimentação de suspensão orgânica aos digestores e desidratação.

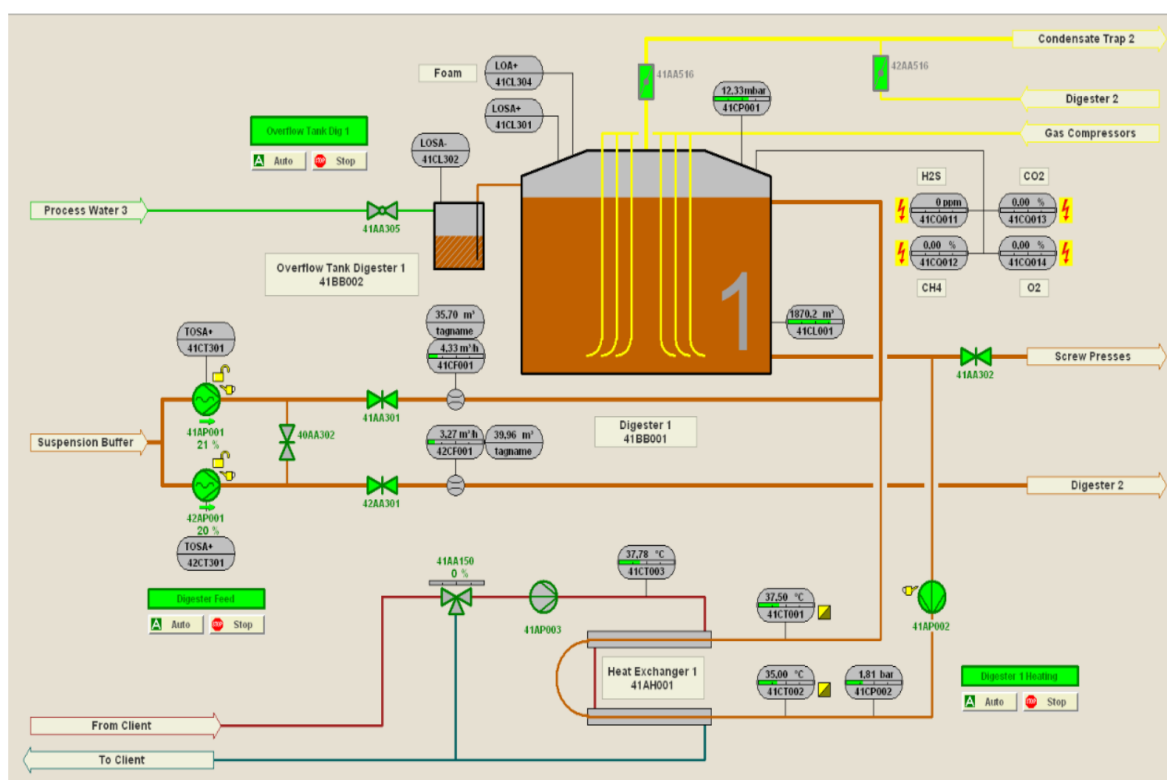


Figura 38 – Painel de monitorização dos digestores (exemplo digestor 1).

3.1.2.1 Produção de suspensão orgânica

A produção de suspensão está fortemente dependente da quantidade de resíduo orgânico e da qualidade, precisamente, do teor de humidade. A suspensão produzida está dependente da funcionalidade e da operacionalidade do *pulpers*. Cada ciclo de *pulping* produz aproximadamente 32 m³ de suspensão. Para satisfazer o balanço da suspensão a introduzir nos digestores e a suspensão a armazenar, são necessários 10 ciclos de *pulping* ou seja 320 m³/dia, que efetivamente irá perder volume durante a fase de espessamento.

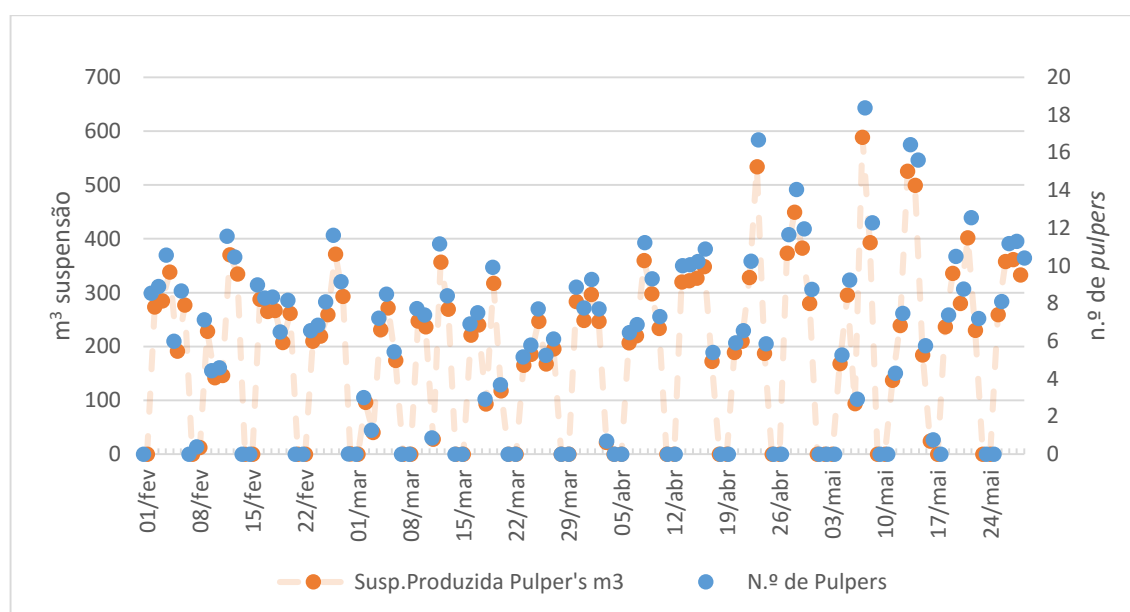


Figura 39 - Perfil de produção de suspensão orgânica.

Conforme o demonstrado na Figura 39 a produção de suspensão não é linear, a operacionalidade dos *pulpers* por vezes não é contínua, entre serviços de manutenção, entupimento de válvulas ou avarias. É fundamental para o processo biológico a linearidade deste procedimento, o não cumprimento da meta dos 10 *pulpers* diários terá que ser compensada posteriormente durante o período semanal, estas oscilações causam instabilidade, o processo de metanização não é completo, o que fomentará a introdução de grandes de suspensão pouco maturada, atrasando o processo de metabolização da matéria orgânica, incitando à acumulação de AGV e ao aumento da concentração de NH₄⁺.

3.1.2.2 Tanque de suspensão

A retenção durante o período de 4 a 5 dias no tanque de suspensão é fundamental para a maturação da suspensão e para o equilíbrio do pH na ordem dos 5-5,2. Criar condições para a maturação da suspensão é fundamental para o desempenho na produção de biogás. A fim de demonstrar a variação da suspensão no tanque, foi traçado um perfil do nível de suspensão desde Fevereiro até fim de Maio.

Pela análise da Figura 40 é notória a variação acentuada do nível de suspensão no tanque, a esta variação deve-se basicamente à quantidade de suspensão produzida. Oscilações permanentes dificultam a estabilidade do sistema, a resposta e o indicador principal é explanado sobre o produto final ou seja produção de biogás.

O objetivo da apresentação da variação do nível de suspensão orgânica no tanque de suspensão reside sobre a instabilidade do processo e na dificuldade em cumprir o critério de retenção da suspensão o tempo suficiente para o crescimento de bactérias acetanogénicas.

O sistema apresenta estabilidade quando nos períodos em que o nível do tanque de suspensão sobe gradualmente e de forma sazonal, nomeadamente, quando é retido um volume entre 100 a 150 m³ diários. É denotado que a produtividade ao fim de semana, quando o período de retenção é atingido, é superior quando este critério é cumprido.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

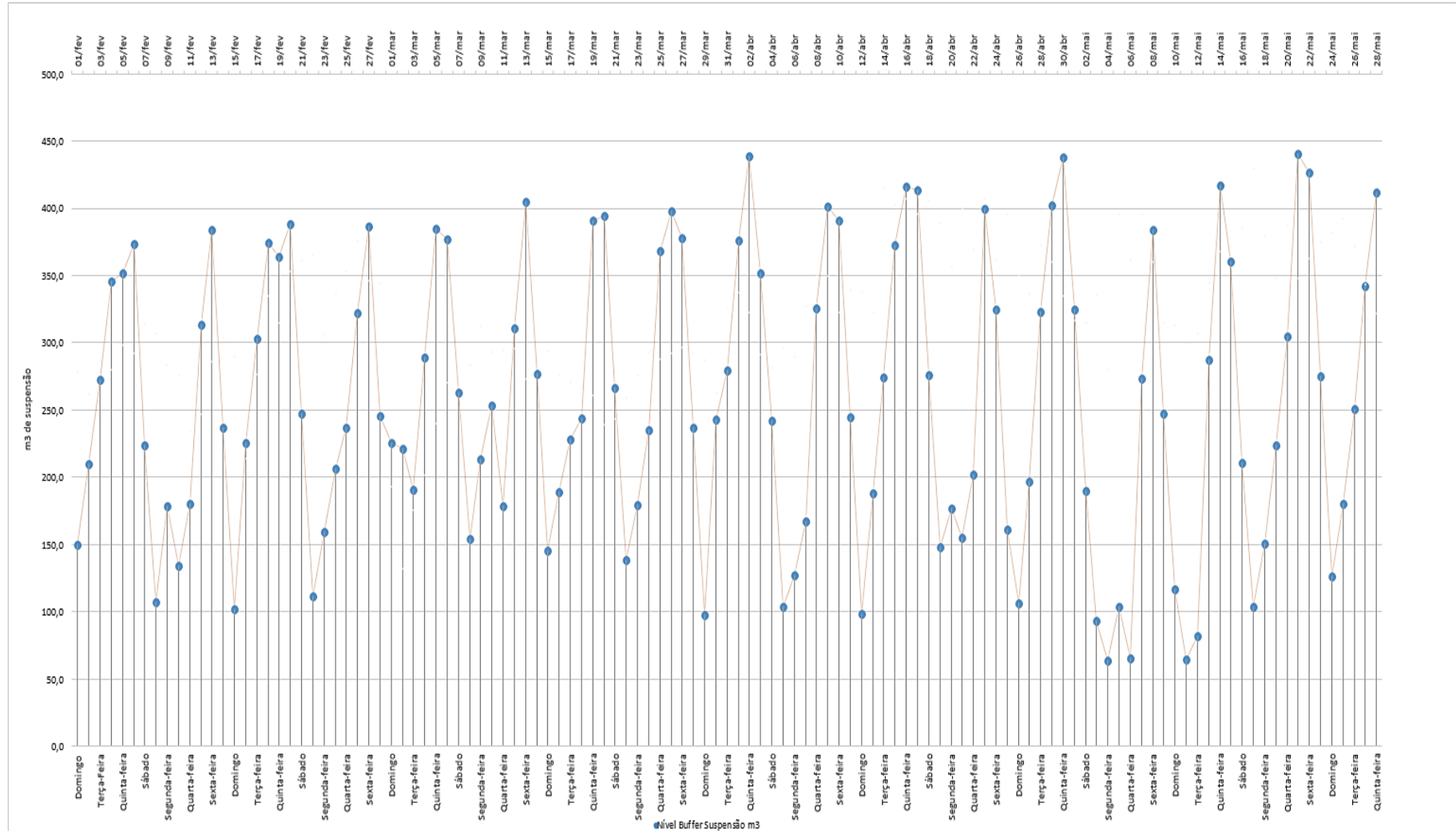


Figura 40 - Variação do nível da suspensão no tanque de suspensão

3.1.2.3 Alimentação de suspensão orgânica aos digestores

A alimentação aos digestores é um dos parâmetros mais importantes para a produção de biogás, em particular no que diz respeito à fração biodegradável da matéria orgânica.

Como forma de quantificar a matéria orgânica introduzida nos digestores é efetuada a medição de sólidos totais e sólidos voláteis contidos no tanque de suspensão. Uma das formas de obter uma produção estável é garantir que a suspensão alimentada aos tenha um teor de sólidos entre 8%-10% massa e um teor de sólidos voláteis entre 50%-65% massa. Para garantir uma suspensão com a qualidade referida é necessário regular e adequar a operação do tratamento hidromecânico, efetivamente, é necessário aumentar a quantidade de resíduos orgânicos durante o *pulping* (formação da pasta ou suspensão) e durante o espessamento garantir um teor de humidade e de matéria sólida equilibrada. Por uma questão de logística e de limitação da central na receção de resíduos sólidos urbanos, a Suldouro estipulou uma alimentação diária de 75 m³ de suspensão em cada digestor, embora, sejam registadas algumas variações por avarias técnicas.

Foram medidos o teor de sólidos totais e sólidos voláteis no tanque de suspensão (Figura 36) e nos digestores (Figura 35), o que permitiu determinar a carga orgânica nos digestores e respetiva correlação com a produção de biogás, isto é, o rendimento.

Dentro do parâmetro da alimentação são monitorizados outras variáveis, como caudal médio diário, totais diários, e regime de alimentação (anexo II).

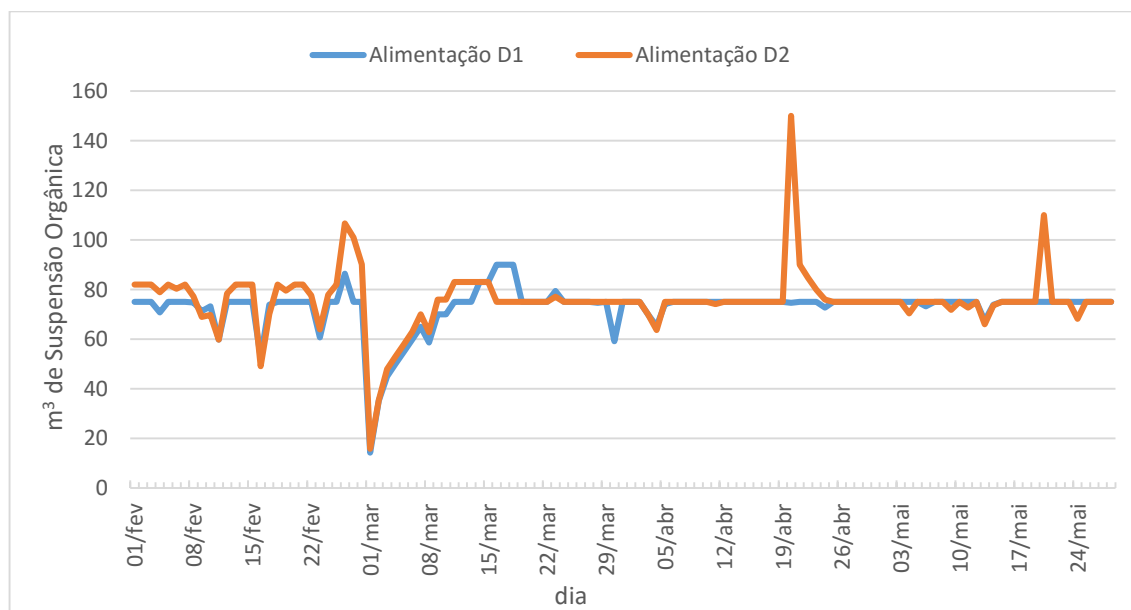


Figura 41 - Perfil de alimentação de suspensão aos digestores.

A Figura 41 representa a variação do volume diário de suspensão alimentado aos digestores. O perfil foi traçado para o período de quatro meses, desde de 2 de Fevereiro 2015 até 28 de Maio de 2015. Durante o mês de Fevereiro e até 22 de Março é perceptível a existência de grandes irregularidades nos volumes de suspensão introduzidos. Estas irregularidades e variações não são saudáveis, no processo de digestão anaeróbia, pela constante alteração do tempo de retenção hidráulico, quando maior for o volume de suspensão alimentado, menor será o tempo de retenção hidráulico, logo, menor será a taxa de degradação da matéria orgânica.

Dentro deste contexto, a Suldouro estabeleceu uma alimentação na ordem dos 75 m³ de suspensão em cada digestor, perfazendo um volume diário de 150 m³, estabelecendo-se um tempo de retenção hidráulico ≈ 27 dias, desprezando o efeito da desidratação.

3.1.2.4 Impacto da ausência de alimentação

A alimentação é um fator preponderante na produção de biogás, como forma de justificar a afirmação foi destacado a título de exemplo de um período de ausência de alimentação, consequente da avaria do sistema de bombagem. Nestas circunstâncias foram registadas elevadas quebras na produção de biogás quando os digestores ficam inibidos de matéria orgânica biodegradável.

A produção de biogás é proporcional à alimentação de suspensão orgânica aos digestores, perturbações neste segundo parâmetro refletem quebras acentuadas no primeiro. Como forma de demonstrar o impacto da alimentação na produção de biogás foi destacado um período de privação de introdução de suspensão orgânica. Este período foi registado entre o dia 1 e 2 março e teve uma duração de 32 horas. A Figura 42 concerne na representação gráfica obtida pelo *software* de gestão da central, ao qual se pretende destacar variáveis como perfil de alimentação no tempo, caudal de alimentação (m³/h). A Figura 43 concerne numa representação gráfica obtida a partir da mesma fonte ao qual se pretende destacar o perfil de produção de biogás no tempo e o respetivo caudal de biogás produzido (m³/h). Com principal enfoque nestas variáveis, é pretendido transmitir e reter a proporcionalidade existente quando os digestores são sujeitos a introdução de suspensão e ao caudal de biogás. Efetivamente é possível reter uma produção de biogás superior no mesmo período de alimentação, tanto quanto, é perceptível um decréscimo abrupto na ordem dos 40 a 60%, em determinados períodos, do caudal de biogás quando os digestores são inibidos de suspensão.

Em termos práticos, este efeito é registado para longos períodos de ausência de suspensão alimentada aos digestores, eventualmente, estes períodos de abstinência têm repercussões a longo prazo nos parâmetros de estabilidade, sendo necessário atuar de forma racional na recuperação.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás



Figura 42 – Perfil do regime de alimentação ao digestor 2 em período de quebra na alimentação; Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m³), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão (m³/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m³) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

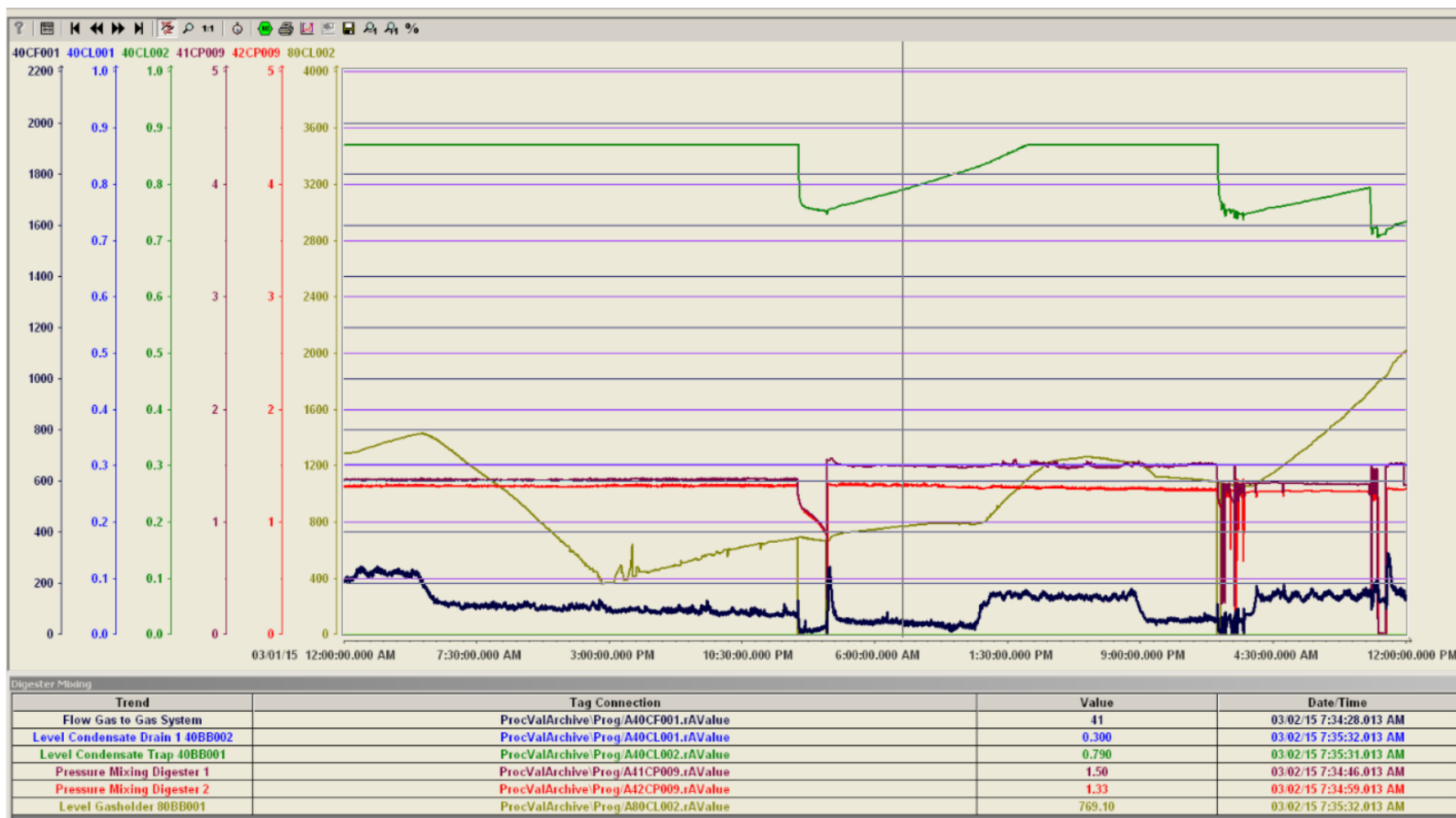


Figura 43 – Perfil de produção de biogás para período de quebra na alimentação - Caudal de biogás para o sistema de gás (m^3/h), **Nível de condensado no dreno de condensado 1 (m^3)**, **Nível na armadilha de condensados (m^3)**, **Pressão de mistura digestor 1 (mbar)**, **Pressão de mistura digestor 2 (mbar)**, **Nível do gasómetro (m^3)**.

3.1.2.5 Desidratação

A desidratação é o processo de remoção de suspensão dos digestores para a produção de composto orgânico. Este processo provoca um choque biológico causado pela remoção de suspensão ativada com microrganismos e material orgânico biodegradável, embora este seja um procedimento necessário para disponibilizar volume útil nos digestores para a admissão de nova suspensão.

A desidratação concerne numa perturbação para o sistema dado o desfasamento que ocorre entre o volume de suspensão alimentado e o volume de suspensão para desidratação. O volume de suspensão para desidratação é parâmetro ao qual não é possível intervir, uma vez que é necessário adequar os balanços durante a semana para compensar o volume de suspensão alimentada durante o fim-de-semana e a ausência de desidratação.

A Tabela 25 do anexo II apresenta os caudais de desidratação de suspensão face aos caudais de alimentação de suspensão. O balanço entre a alimentação e a desidratação é negativo durante os dias úteis. Este balanço resulta, pelo facto de ao fim de semana não haver desidratação dos digestores sendo necessário durante os dias úteis desidratar os volumes alimentados durante sábado e domingo.

3.1.2.6 Desfasamento Alimentação - Desidratação

Uma das principais problemáticas do desempenho da CVO da Suldouro reside sobre o balanço semanal negativo entre a alimentação e a desidratação. Este fator é corrigido com ao fim de semana, pela presença da alimentação e ausência de desidratação. O balanço negativo semanal deve-se essencialmente ao facto de não haver disponibilidade para desidratar a suspensão ao fim de semana.

O primeiro aspeto negativo concerne sobre alimentar um volume de 150 m³ e por norma, desidratar uma média de 210 m³ de suspensão diariamente, provocando um choque na biologia em desenvolvimento. O segundo aspeto negativo consiste na variação do volume de desidratação, este varia entre os 150 e os 350 m³ dependendo da disponibilidade dos equipamentos para este fim.

Com esta metodologia, a Suldouro não retira proveito da matéria orgânica disponível para a degradação, sendo que, pela análise do CBO₅ da suspensão encaminhada para a desidratação ainda existe uma parte biodegradável, na ordem dos 2000- 2500 mg/L e um teor de sólidos totais de 3% massa e 30% massa de sólidos voláteis.

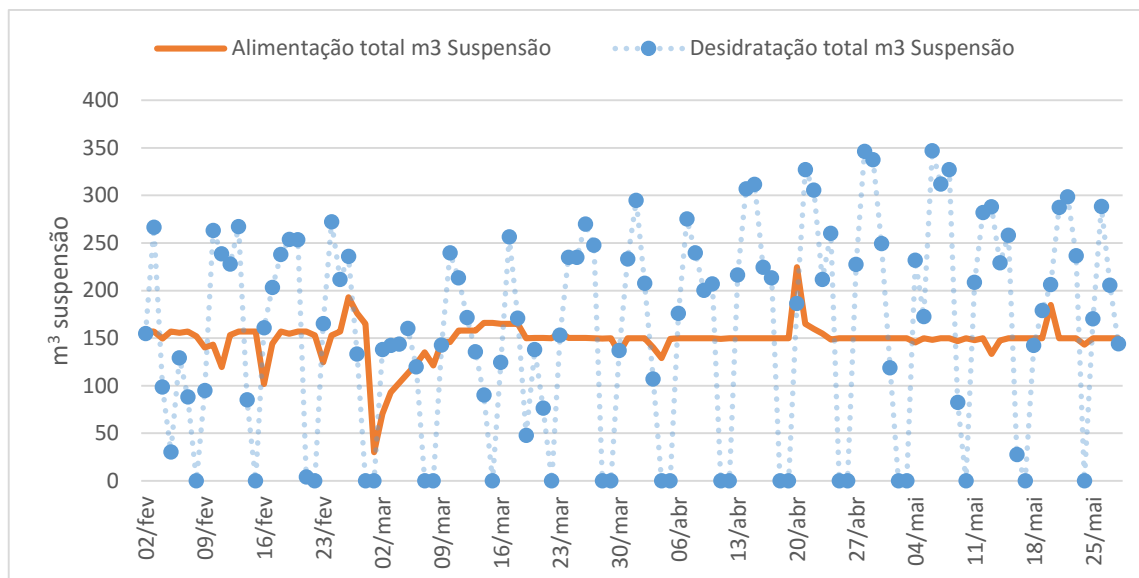


Figura 44 - Perfil da alimentação e desidratação de suspensão.

A Figura 44 representa o perfil da alimentação de suspensão e o volume de suspensão desidratado de suspensão e verifica-se desfasamento entre estas duas variáveis. Como forma de correção deste fator seria plausível desidratar um volume igual ao alimentado. Desta forma, é possível a correção do tempo de retenção hidráulico no digestor de ≈ 16 -17 dias para os efetivos ≈ 27 dias, determinados com base volume alimentado rentabilizando a matéria orgânica biodegradável alimentada.

3.1.3 Medidas de otimização da CVO

Salva a necessidade de incrementar a produção de biogás na central de valorização, foram submetidas três medidas de otimização as quais corresponderam positivamente com um incremento significativo na produção de biogás. As medidas submetidas consistiram em adequar, os regimes de alimentação, adequar e regular as condições de operação do tanque de suspensão e implementar, definitivamente, uma digestão anaeróbia em duas fases, por fim submeter os digestores à ausência de oxigénio.

3.1.3.1 Regimes de alimentação

Os regimes de alimentação têm um papel preponderante na produção de biogás. A Suldouro inicialmente operava num regime de alimentação descontínuo ou alternado, optando posteriormente por um regime de alimentação contínua.

A alimentação de suspensão alternada (Figura 45 e 46) atualmente acontece fruto de avarias do sistema de bombagem ou medidas de mitigação para elevadas flutuações nos caudais. A alimentação alternada ou descontínua consiste em alimentar o dobro do caudal em períodos de trinta minutos ao longo do dia até atingir os 75 m³ diários estipulados, alternando a alimentação entre os digestores utilizando o mesmo sistema de bombagem. Este critério funciona apenas como uma medida de mitigação, embora a alimentação ao digestor seja satisfeita existem outros critérios que não são adequados, nomeadamente os caudais de desidratação.

Os digestores da Suldouro são digestores de alta carga, ou seja, de alimentação e desidratação contínua. A Suldouro adotou este critério após ter iniciado um período experimental nestas condições de operação, na verdade, os registos subsequentes reforçaram a ideia de que este é o tipo de alimentação que confere estabilidade ao sistema e incrementando a produção de biogás em média cerca de 15%, em comparação á alimentação em regime descontínuo

A alimentação descontínua ou alternada conjugada com a desidratação contínua cria uma perturbação no sistema registando-se imediatamente quebras na produção de biogás na ordem dos 10% e superiores se o prolongamento do regime se arrastar na ordem de dias

Com a adoção do regime de alimentação contínuo (Figura 47 e 48) a Suldouro conseguiu potenciar uma produção média na ordem dos 180-200 m³/hora (Figura 49) para uma produção na ordem dos 210-230 m³/hora (Figura 50) para a mesma quantidade de suspensão alimentada. Para justificar este acréscimo na produção estima-se estar relacionado com o desacentuar do fator de desfasamento existente ente a alimentação e desidratação.

Embora nas Figuras 49 e 50 não seja denotada uma variação significativa em termos de produção, As Figuras 51 e 52 respeitantes ao dia 9 junho representam o impacto na produção de biogás e o reflexo causado pelo regime de alimentação em conjunto com a desidratação contínua.

As Figuras 51 e 52 representam o perfil de alimentação de suspensão aos digestores, para o dia 9 de Junho de 2015, pertendendo-se destacar, efetivamente, a alteração do regime de alimentação ao longo do dia e o impacto na produção de biogás.

A alteração de regime deveu-se à instabilidade do caudal na alimentação, sendo registadas flutuações acentuadas e como medida de distribuição no tempo do volume de suspensão definido, a alimentação passou a ser intervalada.

A Figura 53 representa o perfil de desidratação da suspensão dos digestores. Este parâmetro não sofreu qualquer alteração face à alteração ao regime praticado. O principal problema relacionado ao regime de alimentação descontínuo conjugado com a desidratação contínua, deve-se ao período de pausa na alimentação. Estes procedimentos provocam perturbações ao sistema biológico, a remoção de lamas ativadas com microrganismos e contendo fração orgânica, em que parte dela, eventualmente, será matéria facilmente biodegradável, retardando a fase metanogénica, causando flutuações nos parâmetros de estabilidade, nomeadamente, variações no pH e acumulação de AGV, tendo repercussões negativas e significativas na produção de biogás.

Conforme o demonstrado na Figura 54 resposta do sistema à produção de biogás é proporcional ao perfil de alimentação embora seja denotado um decréscimo gradual do caudal a partir do momento que é iniciado o regime de alimentação descontínuo. Como é perceptível pela análise do gráfico explicado na Figura 54, o caudal de biogás produzido encontrava-se na ordem dos 340-360 m³/h enquanto operava em regime contínuo, desprezando as variações de caudal, decrescendo gradualmente para valores entre 230-250 m³/h. Em termos de substrato ou suspensão orgânica introduzida, não existiu qualquer variação neste parâmetro durante o dia. Para certificar e correlacionar diretamente com o efeito do desfasamento alimentação-desidratação seria necessário recorrer à recolha de amostras da suspensão para analisar a teoria da presença de microrganismos metanogénicos e carga orgânica valorizável durante a remoção. Efetivamente é necessário efetuar o mesmo procedimento para a suspensão introduzida.

Com base na Figura 54 é deliberado o regime de alimentação contínuo como uma medida de estabilidade e de otimização da produção de biogás. Eventualmente, neste caso particular, é registado uma instabilidade no caudal por eventuais irregularidades das medições dos caudalímetros, contudo é importante destacar o efeito e a estabilidade da produção durante o regime de alimentação contínua e a instabilidade registada no regime descontínuo.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

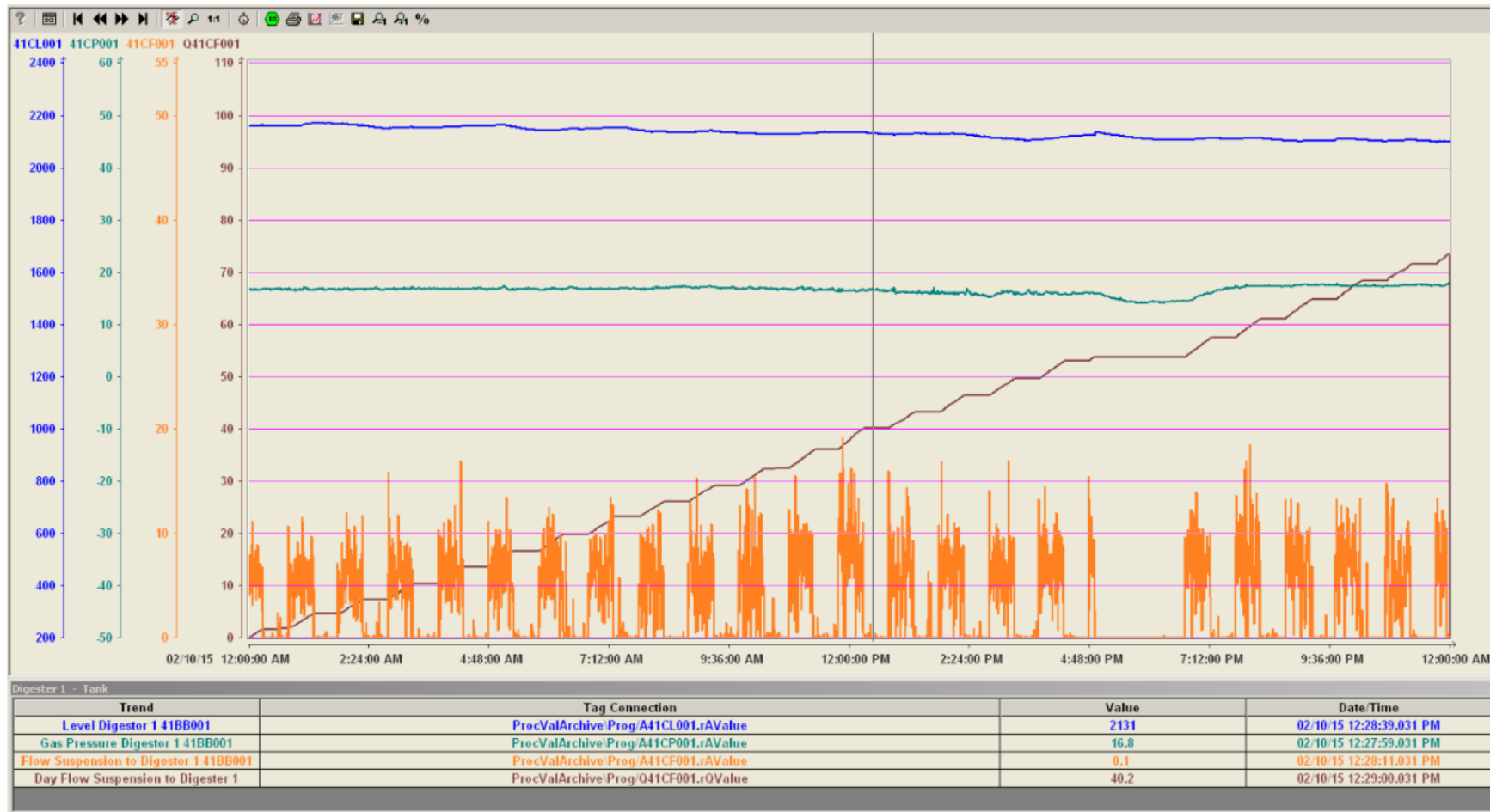


Figura 45 - Perfil de alimentação em regime alternado ou descontínuo ao digestor 1 (10 de Fevereiro); Nível de suspensão orgânica do digestor 1 (m³), Pressão de gás no digestor (mbar), caudal de suspensão (m³/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m³) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

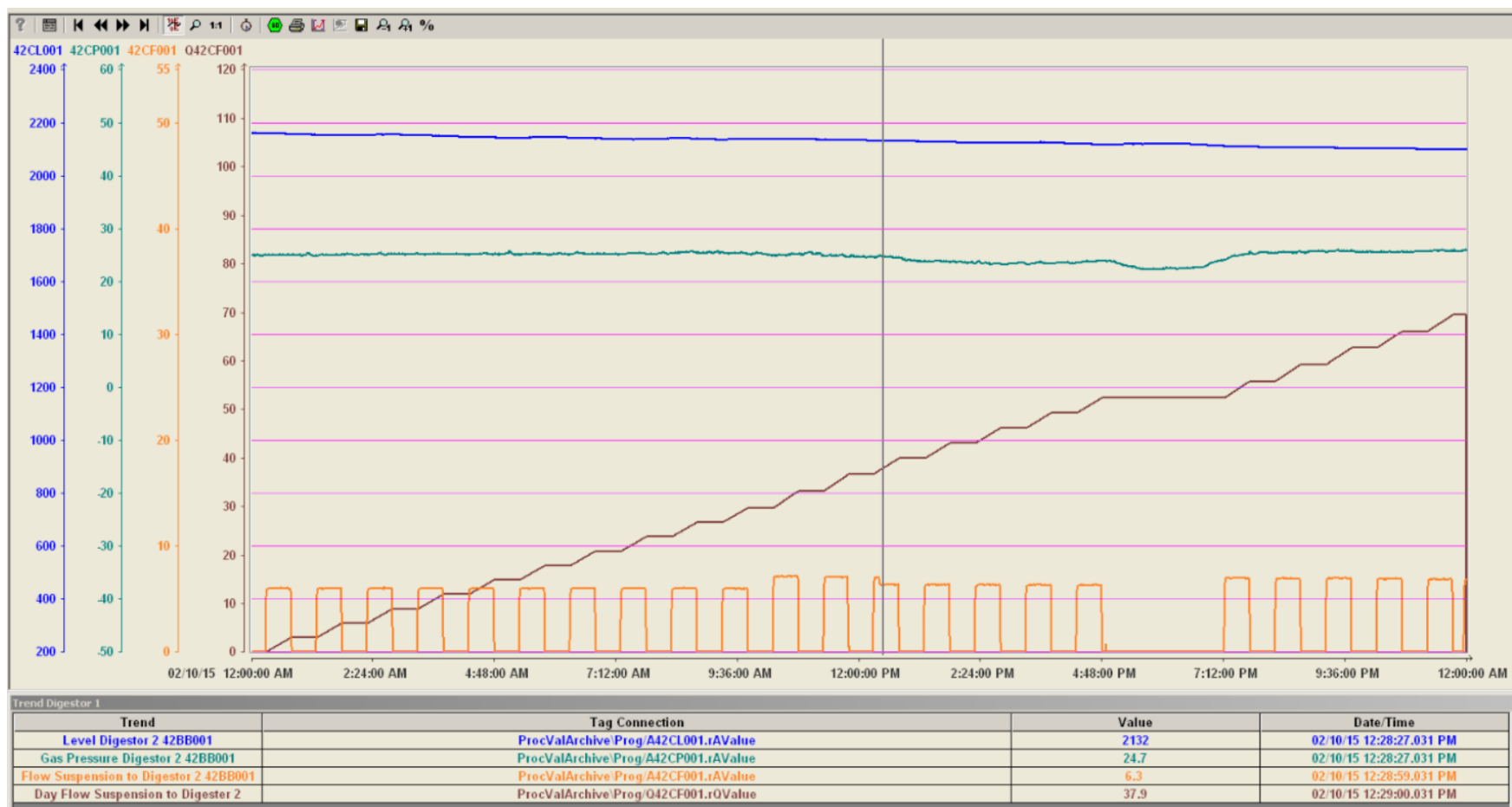


Figura 46 - Perfil de alimentação em regime alternado ou descontínuo ao digestor 2 (10 de Fevereiro); Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m³), Pressão de gás no digestor (mbar), caudal de suspensão (m³/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m³) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

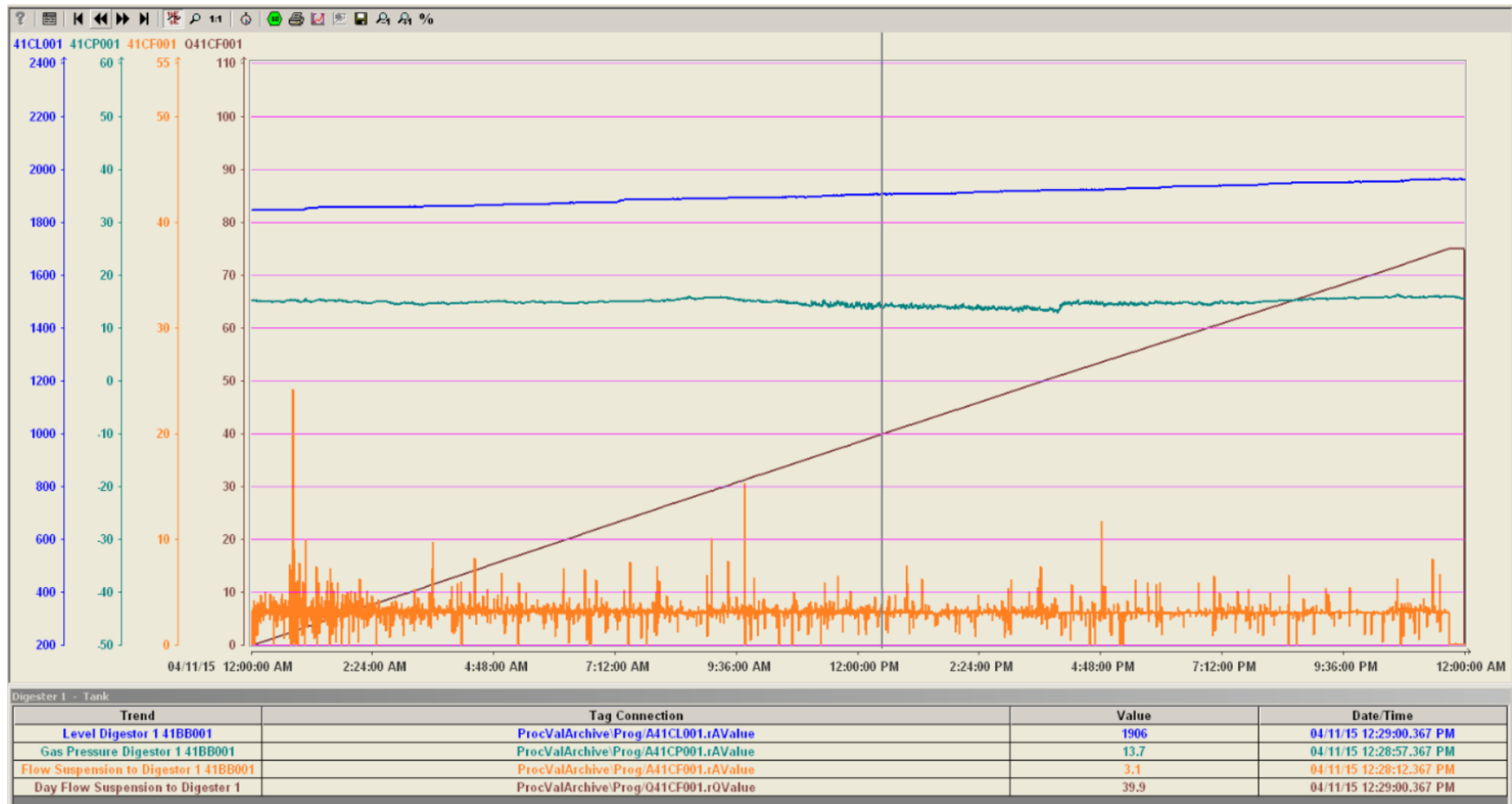


Figura 47 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 1 (11 de Abril); Nível de suspensão orgânica do digestor 1 (m^3), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão (m^3/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m^3) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

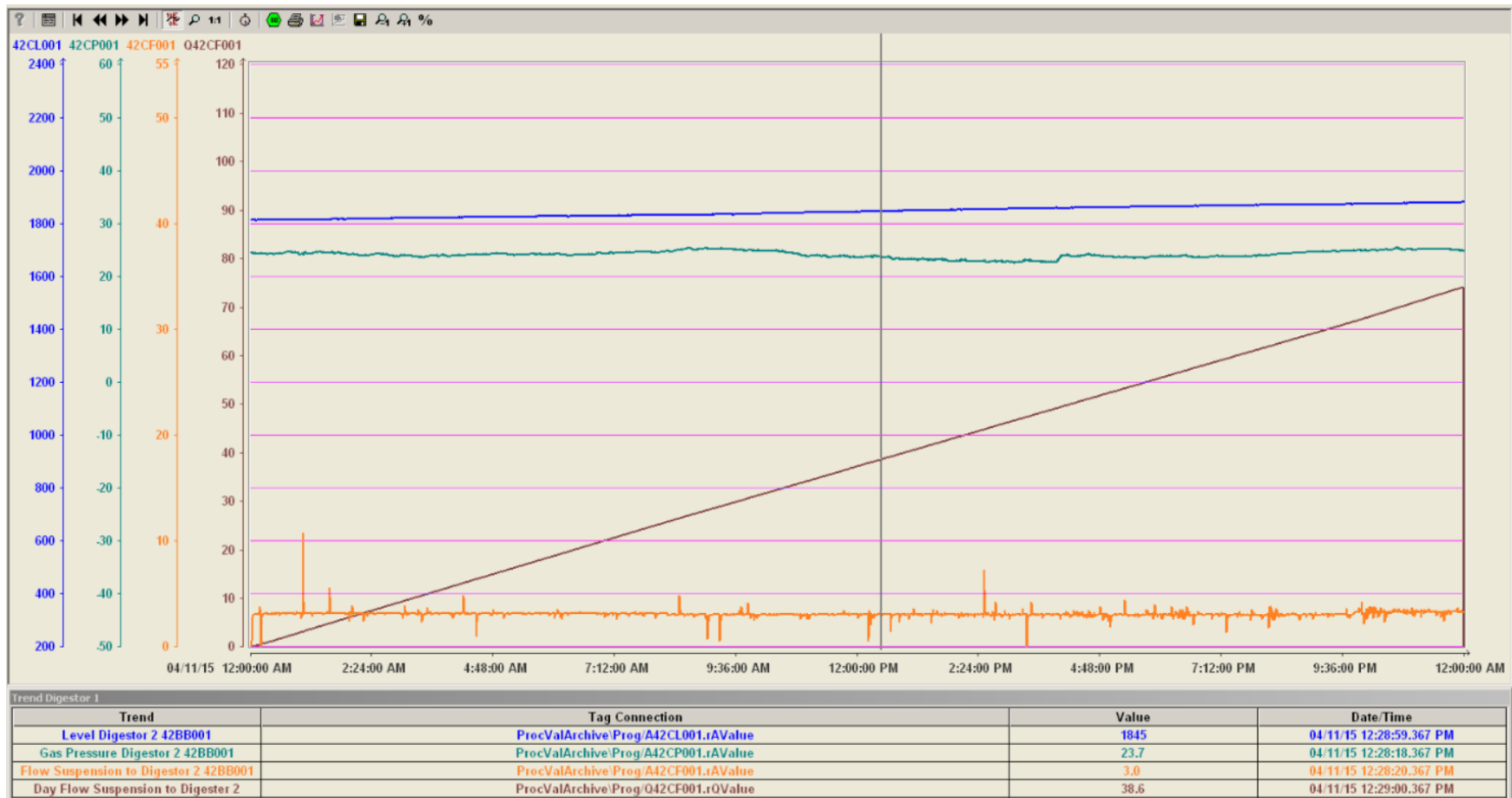


Figura 48 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 2 (11 de Abril); Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m^3), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão (m^3/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m^3) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

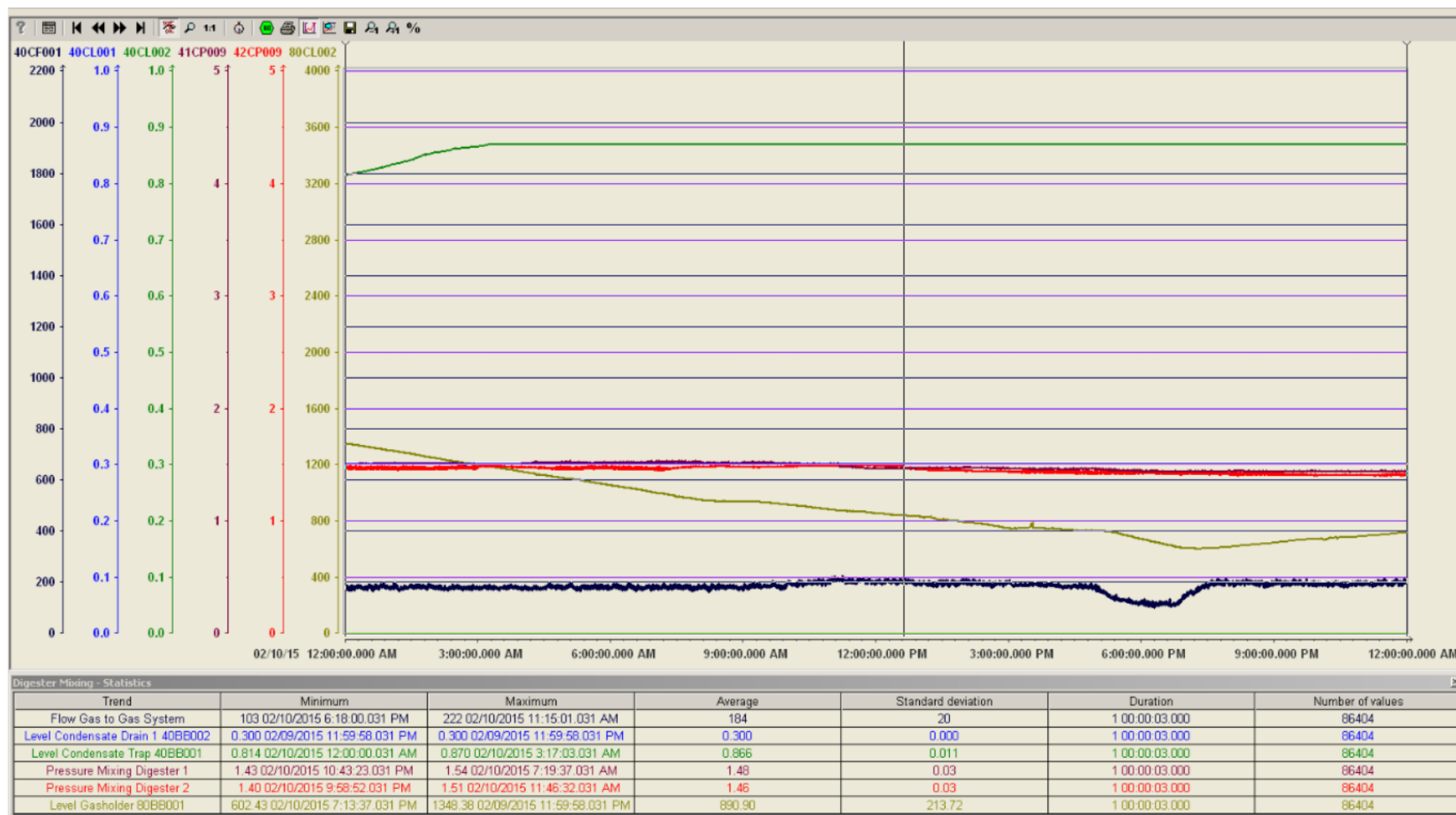


Figura 49 – Painel *Digester mixing* (10 de Fevereiro); Caudal de biogás para o sistema de gás (m^3/h), Nível de condensado no dreno de condensado 1 (m^3), Nível na armadilha de condensados (m^3), Pressão de mistura digestor 1 (mbar), Pressão de mistura digestor 2 (mbar), Nível do gasómetro (m^3).

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

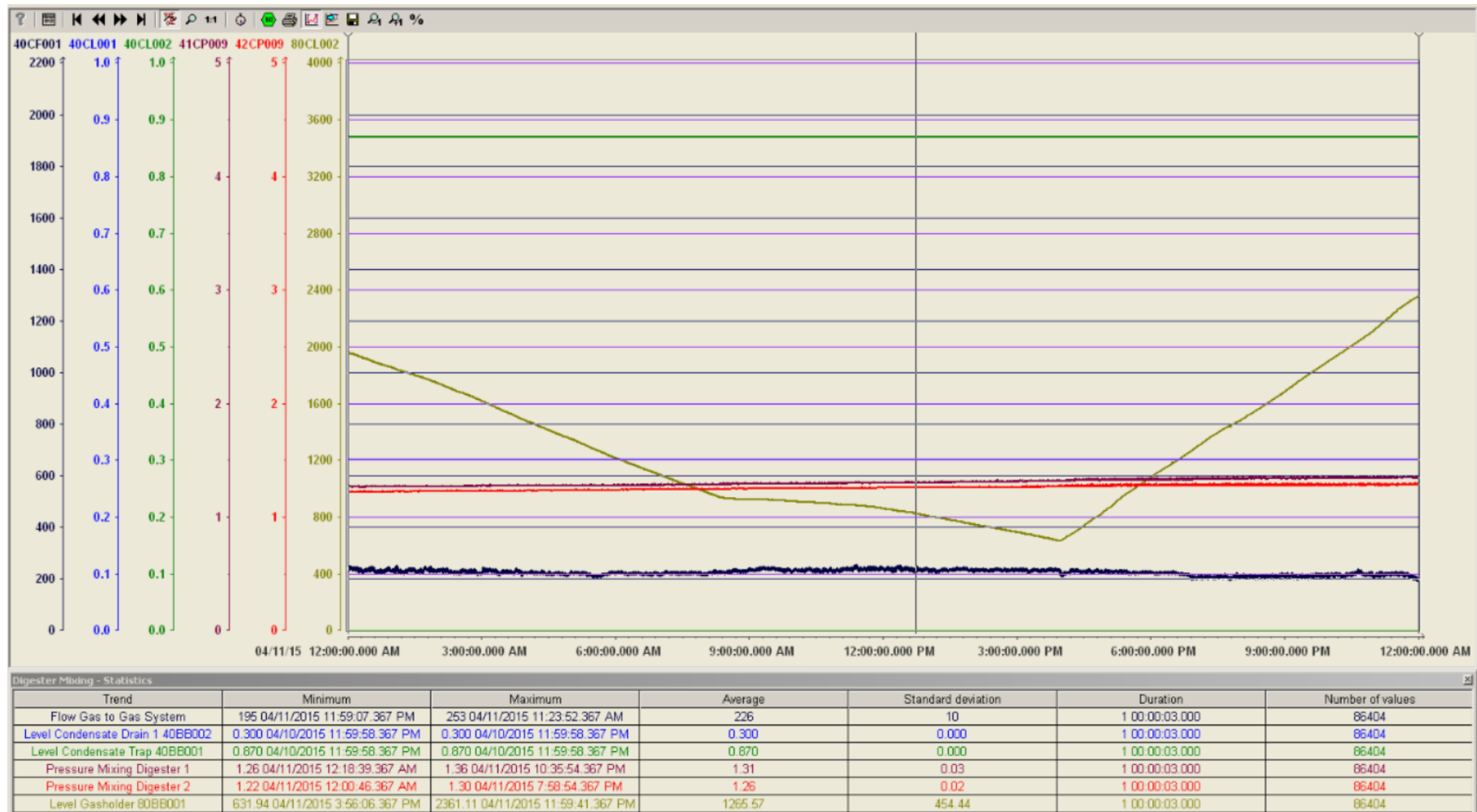


Figura 50 - Painel *Digester mixing* (11 de Abril); Caudal de biogás para o sistema de gás (m^3/h), Nível de condensado no dreno de condensado 1 (m^3), Nível na armadilha de condensados (m^3), Pressão de mistura digestor 1 (mbar), Pressão de mistura digestor 2 (mbar), Nível do gasómetro (m^3).

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

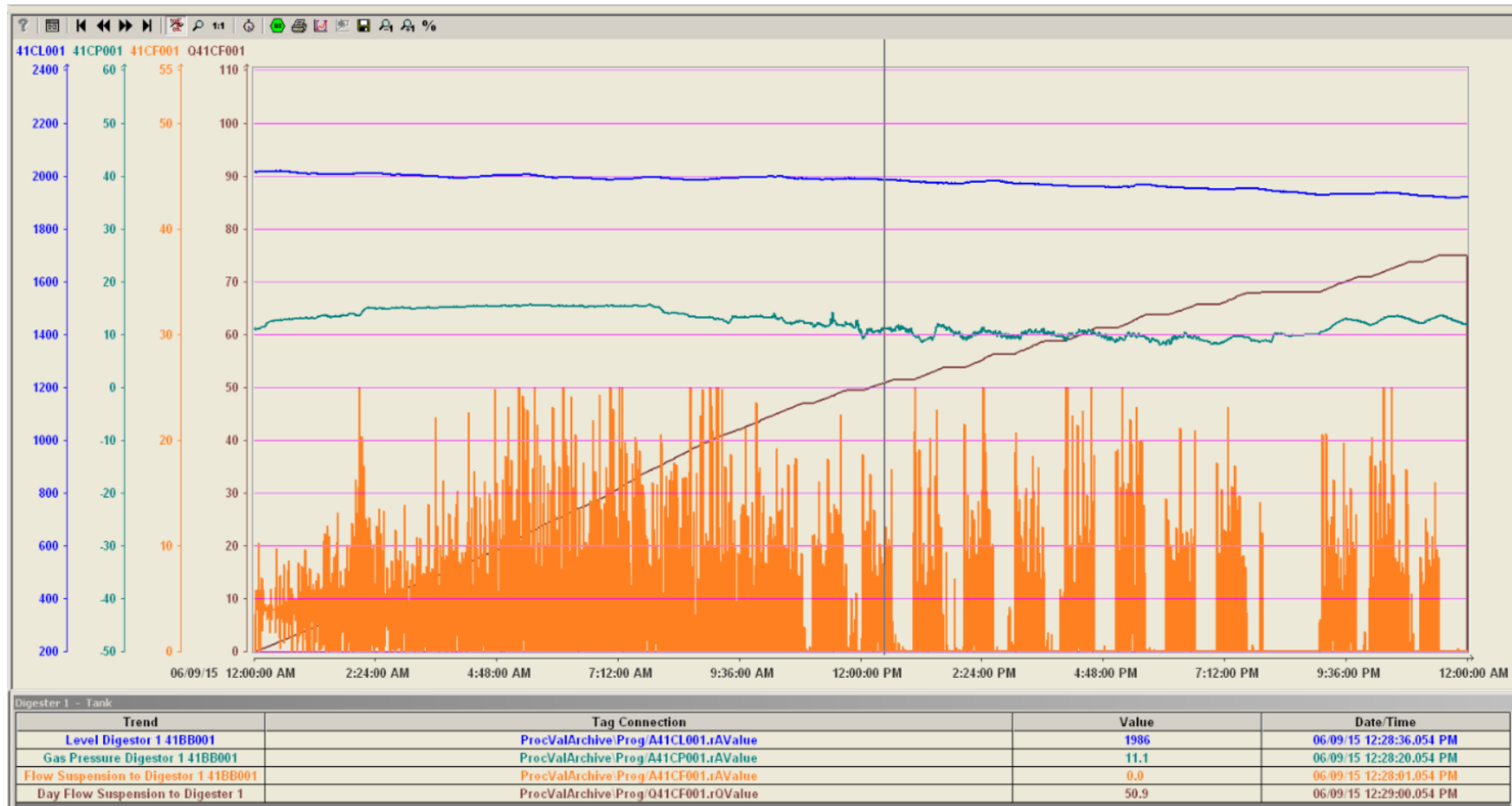


Figura 51 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 1 (9 de Junho); Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m^3), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão (m^3/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m^3) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

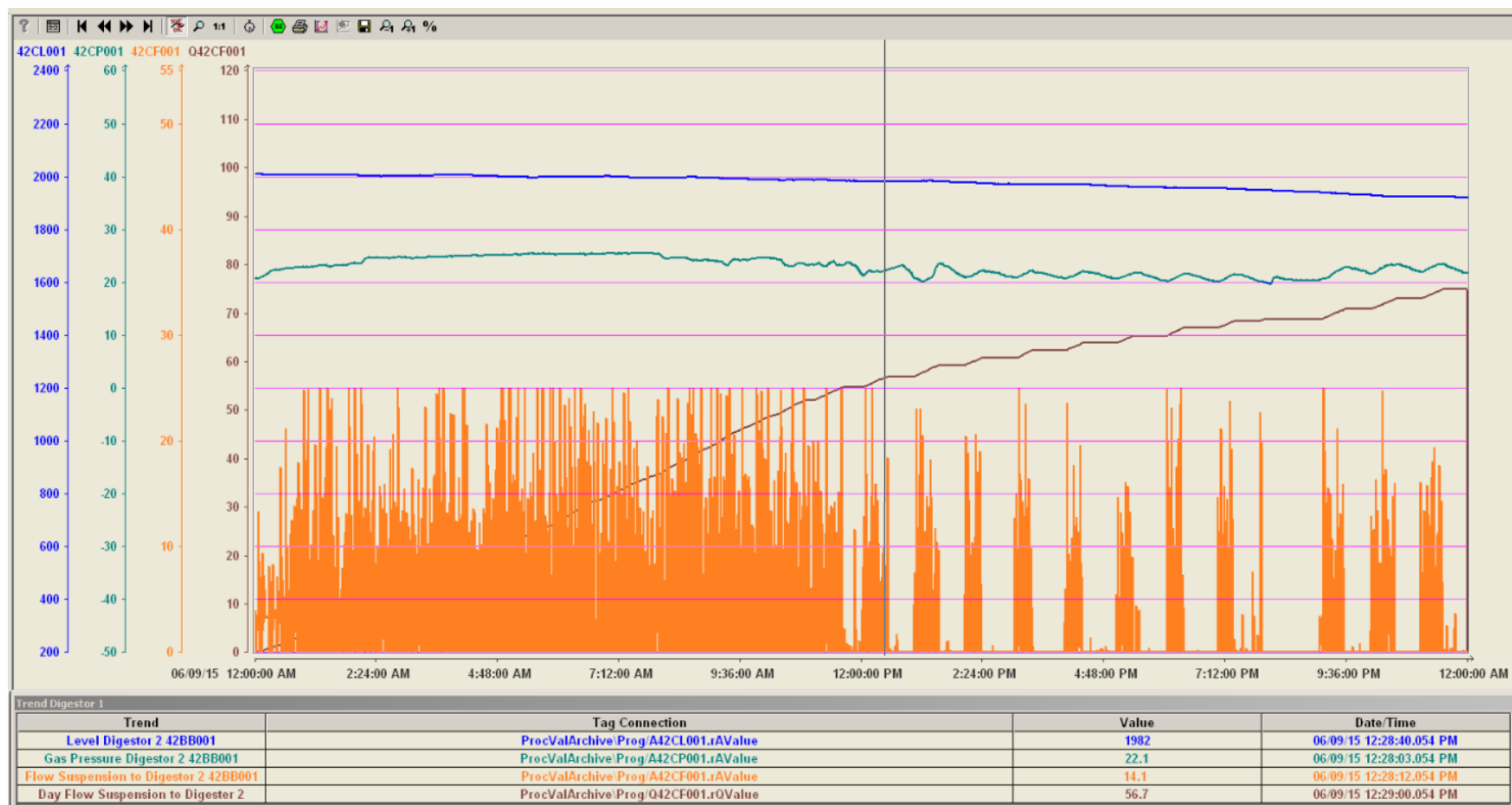


Figura 52 - Perfil de alimentação em regime contínuo ao digestor 2 (9 de Junho); Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m^3), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão (m^3/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m^3) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás



Figura 53 - Perfil de desidratação (9 de Junho); Nível de suspensão orgânica do digestor 2 (m^3), Pressão de gás no digestor 1 (mbar), caudal de suspensão removida (m^3/h), acumulado de suspensão orgânica alimentada (m^3) no período de 24 horas.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

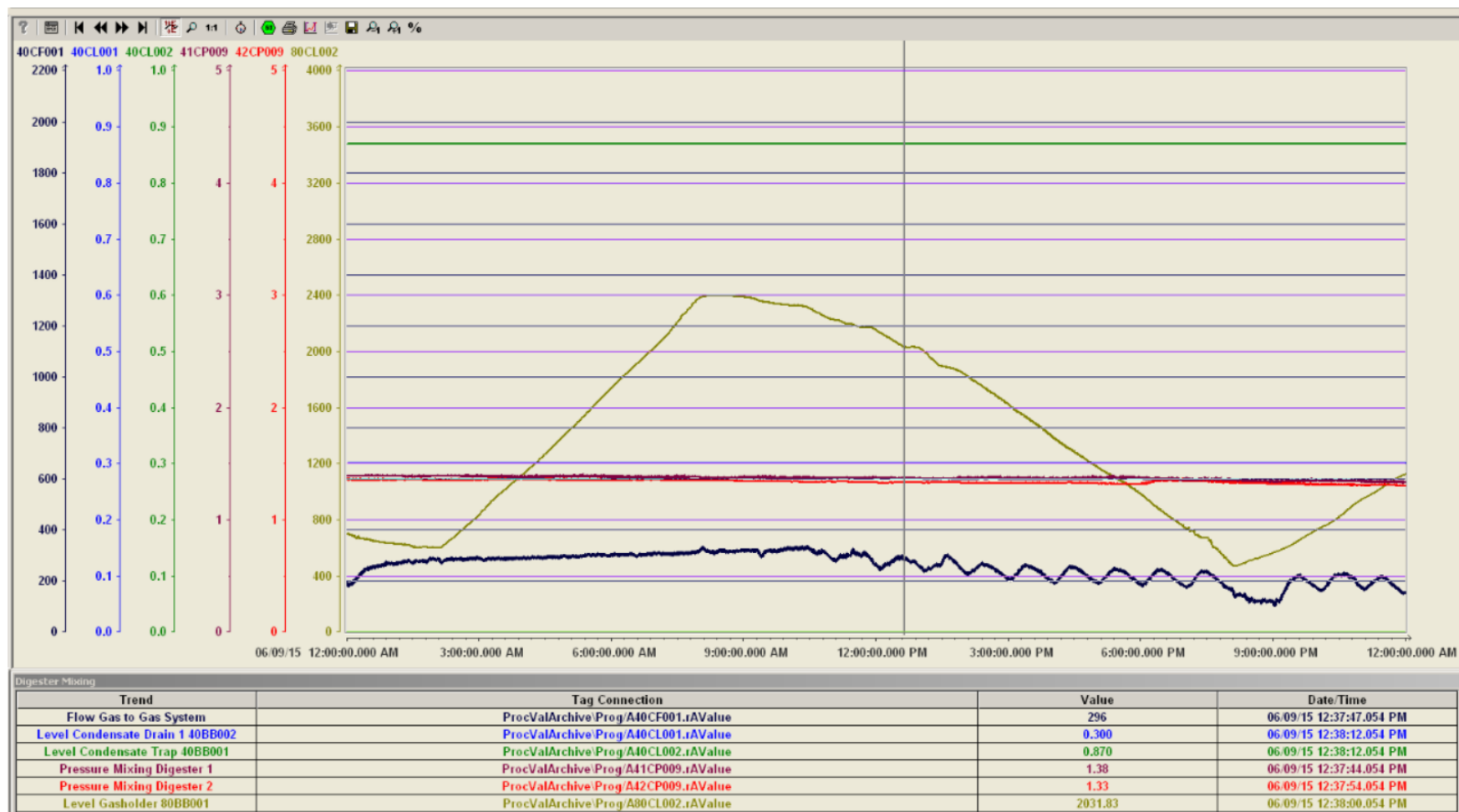


Figura 54- Painei *Digester mixing* (9 de Junho); Caudal de biogás para o sistema de gás (m^3/h), Nível de condensado no dreno de condensado 1 (m^3), Nível na armadilha de condensados (m^3), Pressão de mistura digestor 1 (mbar), Pressão de mistura digestor 2 (mbar), Nível do gasómetro (m^3).

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

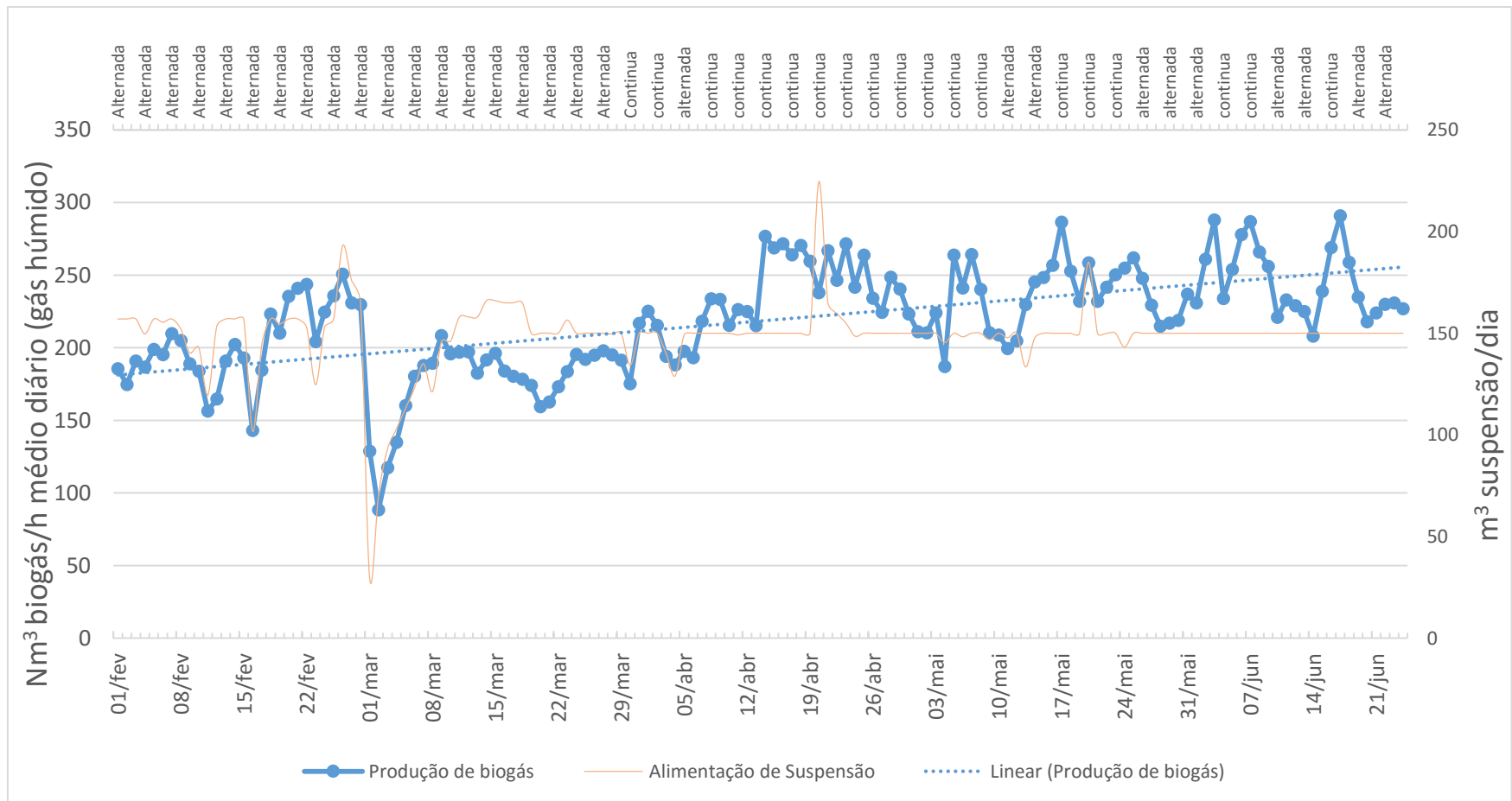


Figura 55 – Evolução ao longo do tempo do caudal médio diário de biogás (Nm^3/h) para diferentes regimes de alimentação (contínua ou alternada).

A Figura 55 representa a variação do caudal de biogás em função da suspensão alimentada e do regime praticado durante o período de estágio. É importante destacar que nem sempre é possível manter uma alimentação continua aos digestores existindo diversos fatores adjacentes que o impossibilitam, no entanto, esta permanente alteração de regime surte efeitos sobre a produção, e com esta figura pretende-se, efetivamente, correlacionar o regime de alimentação praticado com as constantes variações na produção.

É perceptível pela análise da Figura 55 a resposta do sistema quando submetido aos diferentes regimes de alimentação. São denotados caudais médios diários de biogás mais elevados quando os digestores são alimentados continuamente.

3.1.3.2 Regulação dos parâmetros de operação do tanque de suspensão

O tanque de suspensão era operado, sendo considerado um tanque de armazenamento retendo a suspensão e garantindo a alimentação aos fins-de-semana. O tanque de suspensão reúne condições para na globalidade do sistema se efetuar a digestão anaeróbia em duas fases. Este foi o princípio utilizado para desenvolver a regulação do tanque.

A primeira medida consistiu em regular a válvula de rejeição do gás da atmosfera interna do tanque e da admissão de oxigénio, no sistema de agitação da suspensão. Com regulação desta válvula pretendeu-se reduzir o teor de oxigénio e criar condições de anaerobiose da suspensão, dando início as primeiras fases da digestão anaeróbia, nomeadamente Hidrolise, Acidogénese/ acetanogénese.

A segunda medida consistiu em adequar o tempo de retenção da suspensão no tanque de para cerca de 80-90 horas, segundo *Birgit Pfeifer* bióloga especialista em digestão anaeróbia, é o período de estabelecimento de bactérias acetanogénicas. Como é perceptível na Figura 33, o pH no tanque variava entre os 5,5 e os 5,7, registando o decréscimo para valores próximos a 5 a desde o início de maio, associando-se este efeito pH pelo favorecimento das condições no tanque para o acontecimento da fase acidogénica e acetanogénica levando a formação de ácidos no tanque. Embora os efeitos tenham sido denotados próximo a 5 de maio, o processo de retenção iniciou-se a 16 de abril, sortindo o efeito desejado posteriormente. Com esta medida conseguiu-se incrementar a produção em cerca de 5% em relação ao conseguido com as restantes medidas.

3.1.3.3 Corte de oxigénio nos digestores

A ausência de oxigénio nos digestores é um fator preponderante para a digestão anaeróbia e para a produção de biogás. A adição de oxigénio visava reduzir a concentração de H_2S para concentrações $<500\text{ ppm}$, limite máximo admitido nos motores, para prevenir a corrosão dos componentes. A redução da concentração de H_2S é fruto da inibição das bactérias redutoras de sulfatos, que pela adição de oxigénio leva à formação de bactérias fermentativas, estas são competitivas com as redutoras de sulfatos, sobrepondo-se pelas condições favoráveis ao crescimento. ^[10] Consequentemente, a ausência de oxigénio proporcionou um incremento da concentração de H_2S , e como medida de remoção do Ácido Sulfídrico passou a ser utilizado o método de adsorção pela adição de Hidróxido de Ferro.

Efetivamente, a adição de oxigénio em caudais elevados, no sistema de agitação, no digestor retarda o desenvolvimento de microrganismos metanogénicos e nos parâmetros de estabilidade.

O corte de oxigénio iniciou-se no dia 11 de abril, pela ausência de oxigénio no digestor 1, dando início a um período de experimental, ao fim de quatro dias a produção de biogás incrementou cerca de 15 %, registando-se períodos em que as produções foram na ordem dos $6300\text{ a }6800\text{ Nm}^3.\text{dia}^{-1}$; as condições normais de pressão e temperatura são respetivamente 101325 Pa e $273,15\text{ K}$. Posteriormente, foi iniciado um outro período de adição de oxigénio no digestor 1, com um caudal efetivamente mais reduzido, cerca de $2,2\text{ m}^3/\text{h}$, e corte total do oxigénio no digestor 2, que tinha um caudal de oxigénio, entre os $4\text{--}5\text{ m}^3/\text{h}$ e registado o comportamento de ambos os digestores em termos de estabilidade e de produção total de biogás, denotando-se uma resposta do digestor 2 semelhante à do digestor 1 nas mesmas condições.

3.1.4 Monitorização da produção de biogás

A monitorização deste parâmetro é sinónimo da produtividade da instalação, é com base neste parâmetro que é avaliado desempenho da instalação. Durante o período de estágio foi importante também acompanhar a produção de biogás, tendo em conta as medidas de otimização implementadas. Foram efetuados registos diários da produtividade e traçado um perfil de desenvolvimento ao longo do tempo.

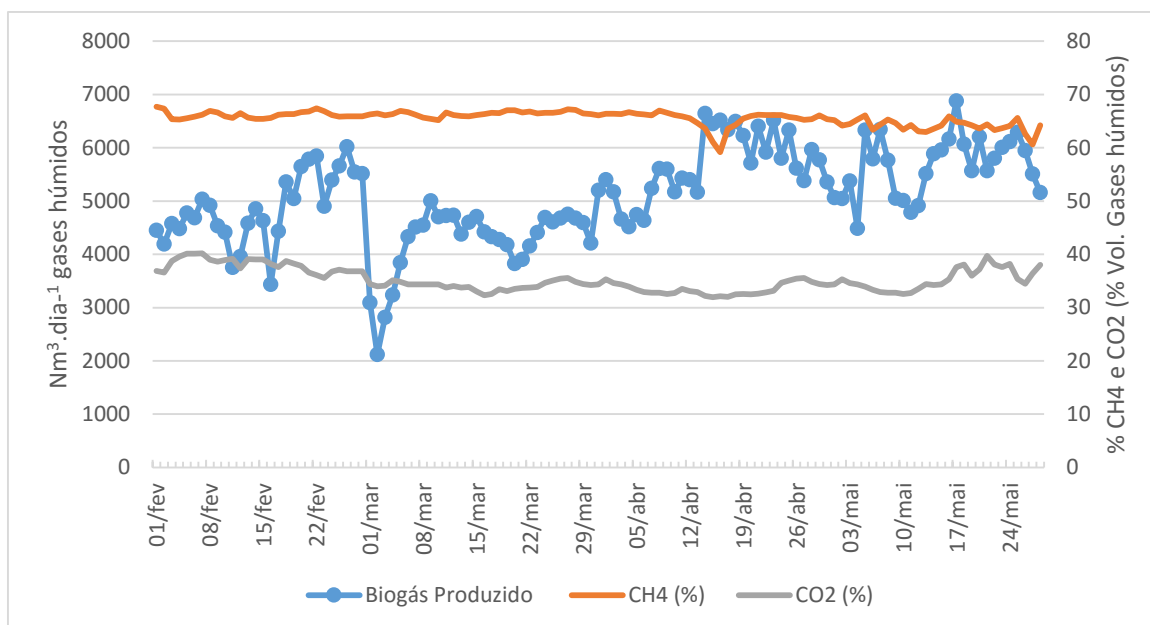


Figura 56 - Perfil de composição e quantidade de biogás produzido na CVO.

A Figura 56 representa o perfil de produção de biogás durante o período de estágio, efetivamente, representa também o colmatar de um conjunto de medidas de otimização efetuadas. A Suldouro em 2013 e 2014 tinha uma produção diária de biogás na ordem dos 4000 a 4500 Nm^3 e esporadicamente, registava produções ordem dos 5000 Nm^3 diários à semelhança do mês de Março de 2015.

Entre Abril e Maio de 2015 a Suldouro, viu este parâmetro a ser projetado para valores entre os 6000 e 6800 Nm^3 totais, ocorrendo produções inferiores esporadicamente, associados a avarias nos equipamentos de alimentação e variações na operação. Em termos de qualidade do biogás, a concentração de metano concordou entre os 63-66 %/v não tendo flutuações significativas durante a aplicação das medidas de otimização.

3.1.4.1 Rendimento de biogás

O rendimento de biogás é calculado (Tabela 3) com base na matéria orgânica introduzida diariamente nos digestores, face ao biogás produzido. Não é possível obter uma correlação direta ou completa pela análise individual deste critério. Eventualmente são registados valores acima do máximo teórico entre 650 a 700 $\text{Nm}^3/\text{ton SV}$, o que poderá estar associado a erros de medição dos equipamentos ou eventual variação no volume de amostra para o cálculo da massa volúmica da suspensão orgânica. Os valores obtidos e explanados na tabela 3 encontram-se muito próximos a

máximo teórico, embora tenham sido considerados que todos os sólidos voláteis introduzidos fossem biodegradáveis, existe a possibilidade de causar alguma dispersão desse valor. Para ter uma análise concreta é necessário proceder a uma análise mais sucinta à suspensão orgânica biodegradável introduzida.

$$\text{Carga orgânica (ton SV/dia)} = \frac{Va \times ST \times SV}{1000} \quad \text{Eq.1}$$

Va- volume de suspensão alimentado (m³)

ST – Sólidos totais (% massa)

SV – Sólidos voláteis (% massa)

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Biogás produzido}}{\text{Carga orgânica}} \quad \text{Eq.2}$$

Tabela 3 – Cálculo do rendimento de biogás por tonelada de sólidos voláteis introduzidos.

Volume suspensão alimentado (m ³)	Sólidos totais (% massa)	Sólidos Voláteis	SV (ton SV/dia)	Produção biogás (Nm ³)	Rendimento (Nm ³ biogás/ Ton Sv)
150	10%	63%	10	6242	619
150	9%	65%	8	5706	685
150	9%	62%	8	6019	754
150	10%	62%	9	5967	669
150	9%	67%	9	6133	711
150	9%	66%	9	6242	705
150	7%	68%	7	4915	690
150	11%	50%	8	5889	714
150	9%	68%	9	5803	673
150	9%	62%	9	5949	699

3.2 Aterro Sanitário

3.2.1 Monitorização de drenos e poços

A monitorização do aterro sanitário focou-se essencialmente nas condições de produção de gás de aterro nos drenos e poços. Para tal, foi utilizado um analisador de gás (Figura 57) que permitiu monitorizar a concentração de metano, dióxido de carbono, oxigénio, H_2S , assim como a pressão absoluta e relativa. Através deste equipamento é obtida a informação da composição do gás de aterro e da pressão no ponto de medição



Figura 57 – Analisador de gás (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S) Geotechnical.

Com base na informação instantânea, e principalmente, e caso seja detetada a presença de oxigénio, o dreno ou poço é regulado para uma pressão relativa a tender para 0 mbar. Este procedimento visa reduzir incidência da depressão sobre o reator. O objetivo desta atividade é incrementar a qualidade do gás de aterro, para monitorizar a produtividade é utilizado um anemómetro portátil para medir a velocidade numa determinada secção.

3.2.2 Monitorização de experiências em aterro

Em termos de monitorização de drenos e poços em aterro foram medidos alguns drenos aleatórios para entender a importância da regulação das válvulas para a produção de gás de aterro em termos de quantidade e qualidade. Posteriormente, e em âmbito de estágio foram monitorizadas quatro drenos, 20 poços verticais e 3 poços horizontais. Três dos quatro drenos consistiram em experiências de reabilitação material de refugo proveniente da CVO. O objetivo da monitorização dos drenos consistiu em traçar um perfil de produção ao longo do tempo, analisar o comportamento e registar para determinar a viabilidade das medidas de reabilitação para drenos em termos de produção. Quanto aos poços, consistiram na mais recente medida de reabilitação de áreas cuja exploração era diminuta. A monitorização dos poços verticais e horizontais teve como objetivo determinar a solução mais viável economicamente e com maior potencial de extração de biogás.

Os drenos reabilitados foram catalogados e monitorizados, e traçado um perfil de evolução no tempo. Ainda, foi associado a este projeto a quantidade e tipo de resíduo correspondente a cada medida de reabilitação. Como forma de situar os pontos de medição foi marcado no mapa da Figura 58 os pontos de medição.



Figura 58 – Localização das experiências de reabilitação de drenos no aterro.

Dreno 1 – Refugo

No Dreno 1 foram depositados no início de fevereiro cerca de 50 toneladas de refugo da CVO com uma quantidade de sólidos fixos de 4% massa e sólidos voláteis com 30% massa. Esta experiência consistiu traçar o perfil de produção de biogás tendo em conta o teor de metano de um dreno, exclusivamente dedicado, a material com composição orgânica ainda valorizável, que poderá estar a ser desperdiçado pelo refugo da central de valorização orgânica.

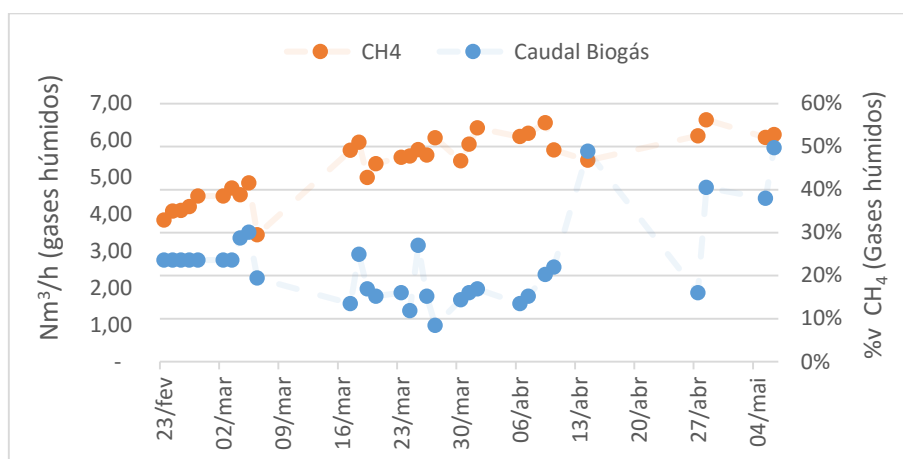


Figura 59 - Evolução do caudal do gás de aterro (Nm³/h) e teor de metano (%v, gás húmido) no Dreno 1.

A Figura 59 representa a evolução ao longo do tempo do caudal de gás de aterro diário e da composição pela medição da concentração de metano. É perceptível, dentro das variações, um crescimento tanto em quantidade como em qualidade, notando-se um potencial não explorado que efetivamente pode ser aproveitado para a geração de energia renovável.

Dreno 2 – Resíduos Sólidos urbanos

O Dreno 2 não constitui uma medida de reabilitação. O facto deste dreno ser monitorizado, deve-se à idade de implementação e ao estudo da operacionalidade do mesmo. Este dreno foi implementado e ativo há 6 anos, e em termos de produção apresentava um caudal na ordem dos 100 m³/h. Com a monitorização deste dreno, pretendia-se analisar o perfil (Figura 60) de um dreno típico de deposição de RSU, através da regulação de teor de metano. O objetivo deste é correlacionar o caudal com o teor metano, e verificar se é possível obter ganhos variando este parâmetro.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

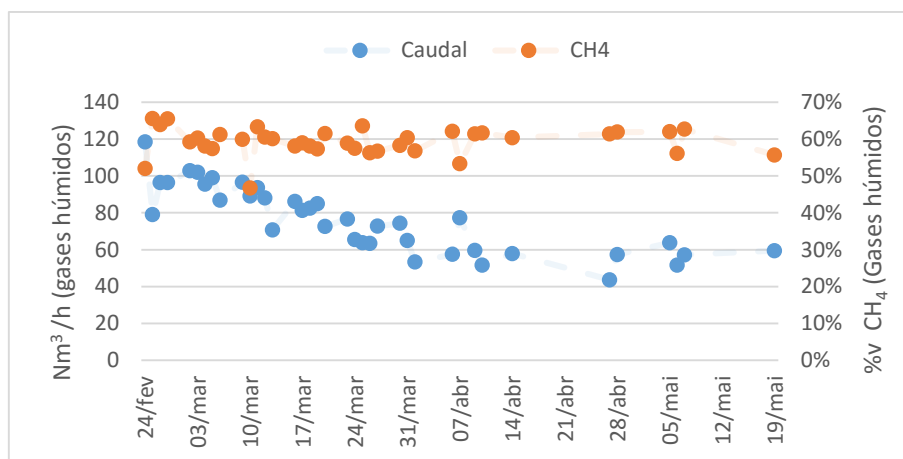


Figura 60 - Evolução do caudal de gás de aterro (Nm³/h) e teor de metano (%v gás húmido) no dreno 2.

Inicialmente foi possível obter ganhos na ordem dos 5-6% pela regulação e enriquecimento do teor de metano, posteriormente, perdas por volta de 30%. Este decréscimo, não foi resultante da regulação, mas associado ao perfil de aspiração e exigência ocorrida no período de monitorização, em que grandes quantidades de gás de aterro extraídos levam ao esgotamento e a perda da capacidade das bactérias atuarem sobre a matéria orgânica.

Dreno 3 e 4 – Sobrenadante da desidratação

Os drenos 3 e 4 foram reabilitados com cerca de 60 m³ cada um, de sobrenadante resultante da desidratação das lamas dos digestores. Este sobrenadante foi utilizado por dois fatores importantes, primeiro pela carga orgânica ainda contida, aproximadamente 2000 mg/L e pelo facto de ainda ter microrganismos ativos. Com este projeto espera-se ativar a microbiologia no reator, fornecendo já algumas condições de estabilidade para se desenvolverem e degradarem possível quantidade de matéria orgânica ainda presente no reator.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

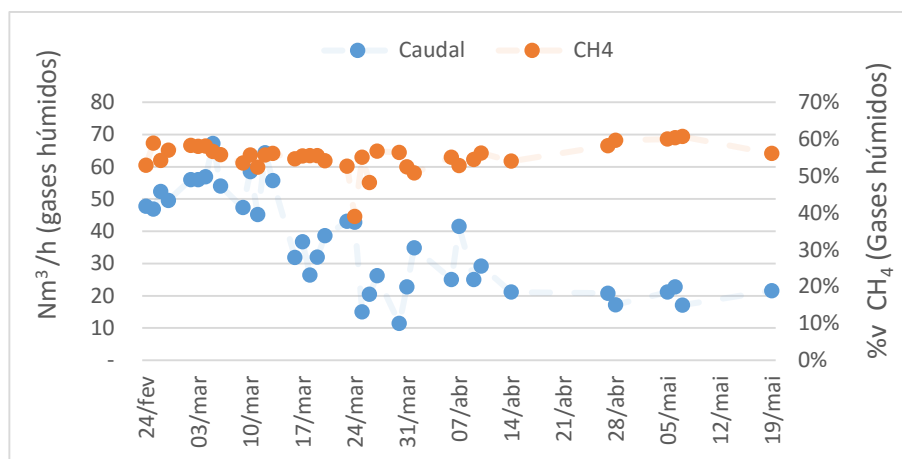


Figura 61 - Evolução do caudal de gás de aterro (Nm³/h) e teor de metano (%v gás húmido) no dreno 3.

A monitorização no dreno 3 (Figura 61) iniciou-se cerca de um mês depois da reabilitação, tendo sido iniciada já num ponto de inflexão, o potencial destas reabilitações é na ordem dos três meses, mas sendo uma medida de reabilitação ao qual deve ser prestada atenção, pois durante esse período são registados caudais diários na ordem entre 20 e 60 Nm³biogás/hora

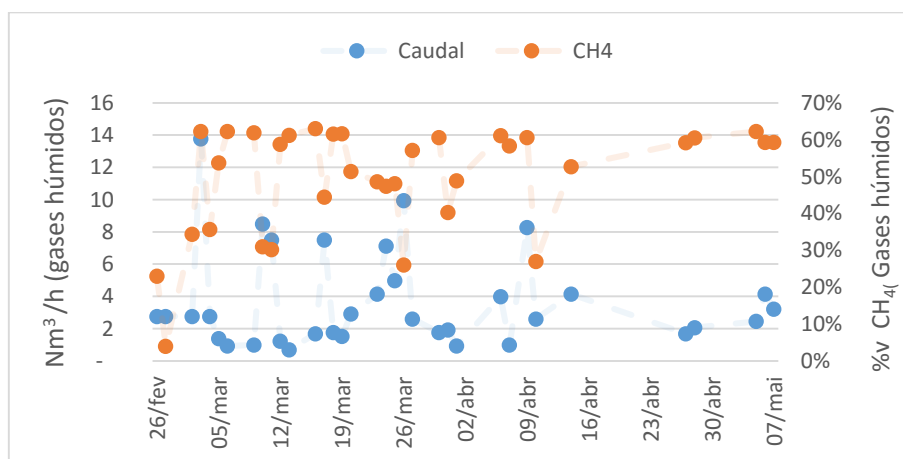


Figura 62 - Evolução do caudal de gás de aterro (Nm³/h) e teor de metano (%v gás húmido) no dreno 4.

O Dreno 4, apesar de ter sido reabilitado com o mesmo método do dreno 3, as variações na composição e na produção são notórias (Figura 62), eventualmente, estas variações estão associadas a configuração da estrutura do dreno. É um dreno superficial, suscetível à entrada de oxigénio, retardando os processos de digestão anaeróbia.

3.2.3 Estudo viabilidade económica entre poços verticais e horizontais

A Suldouro como forma de reabilitação de determinadas áreas do aterro, implementou cerca de 20 poços verticais atingindo 14 metros de profundidade e 3 poços horizontais com 24 metros de comprimento. E como forma de estudar a melhor solução, com maior capacidade de extração e em termos económicos foram feitas medições de caudal de biogás e estimada a extração por metro de tubo instalado conforme o explanado na tabela 4.

Tabela 4 – Produção de biogás por metro de tubo instalado.

	Tubo (m)	Nm³ Biogás/h	m³ gás/m_{tubo}·h
Horizontais	72	27,5	0,4
Verticais	280	134,5	0,5

Considerando o caudal de biogás extraído pelos diferentes poços, as propriedades energéticas do gás e um PCI de 35,9 MJ/Nm³ de metano é determinada a energia fornecida aos motores e utilizando um rendimento de conversão com cerca de 38% é feita uma estimativa de energia produzida diariamente por estes poços e o retorno associado.

$$\dot{m}_{\text{gás}} = v \times A_s \times t \quad \text{Eq. 3}$$

$\dot{m}_{\text{gás}}$ – Caudal de gás de aterro (m³·h⁻¹)

v – Velocidade do escoamento (m·s⁻¹)

A_s – Área secção transversal (m²)

t – Tempo (s)

$$E_{\text{produzida}} (\text{kWh}) = (\dot{m} * \text{concentração } CH_4 \times PCI_{CH_4} \times \eta_{e \text{ motores}}) / (3600) \quad \text{Eq. 4}$$

\dot{m} - Caudal biogás (Nm³·h⁻¹)

Concentração de CH₄ – %v (gases húmidos)

PCI CH₄ – Poder calorífico inferior (kJ·Nm⁻³)

η_e – Rendimento elétrico dos motores

$$\text{Receita } (\text{€} \cdot \text{dia}^{-1}) = E_{\text{produzida}} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \right) \times \frac{1}{1000} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{kWh}} \right) \times \text{Preço venda} \left(\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

Tabela 5- Estimativa de produção de eletricidade e receita gerada.

Referência	Caudal Nm ³ /h	Nm ³ CH ₄ /h (gás Seco)	E Fornecida (kWh)	Conversão em Energia elétrica η=38% (kWh)	Energia elétrica produzida (kWh·dia ⁻¹)	Receita (€·dia ⁻¹)
Horizontais	27,6	10,8	108,0	41,0	985,0	118,19€
Verticais	134,5	62,0	618,8	235,1	5643,1	677,16 €

Considerando a estimativa de energia elétrica produzida pelos poços, o retorno associado para os poços horizontais é aproximadamente 118€ diários e os horizontais cerca de 677 € por dia.

Considerando apenas o investimento do tubo e a receita gerada, o payback associado para os poços horizontais encontra-se nos 38 dias e os horizontais nos 27 dias.

Tabela 6 – Cálculo do Payback para investimento parcial.

	Investimento Tubo (€)	Receita (€·dia ⁻¹)	Payback (Dias)
Horizontais	4500,00€	118,19€	38,1
Verticais	18000,00 €	677,16 €	26.6

$$\text{Payback} = \frac{\text{Investimento } (\text{€})}{\text{Receita } \left(\frac{\text{€}}{\text{dia}} \right)} \quad (\text{d}) \quad \text{Eq.6}$$

Tabela 7- Cálculo Payback para investimento total.

Investimento Total (€)	Receita (€·dia ⁻¹)	Payback (Dias)
34 000,00 €	795,35 €	42,75

Considerando o investimento total, neste caso incluindo, despesas de transporte, aplicação, furação e tubagem e a receita total o payback total é aproximadamente 43 dias.

3.2.4 Monitorização da produção de gás de aterro

A monitorização destes parâmetros consistiu em obter um perfil do caudal volumétrico do gás de aterro extraído ao longo do tempo, considerando variáveis como depressão e concentração de metano. É importante considerar estes fatores, uma vez, que a extração de gás de aterro está dependente deles. A subpressão exercida sobre os reatores biológicos consiste em exercer uma força de sucção incrementado o caudal de gás de aterro extraído. Outro fator importante é a concentração de metano, pelas suas propriedades energéticas é o componente valorizável da mistura.

A monitorização da quantidade de biogás extraído é efetuada com base num *software* que recebe a informação dos caudalímetros que medem o caudal de gás de aterro introduzido no motor, totalizando o volume extraído no período de 24 horas. A composição do gás de aterro é determinada com o recurso ao analisador de gás portátil (Figura 57)

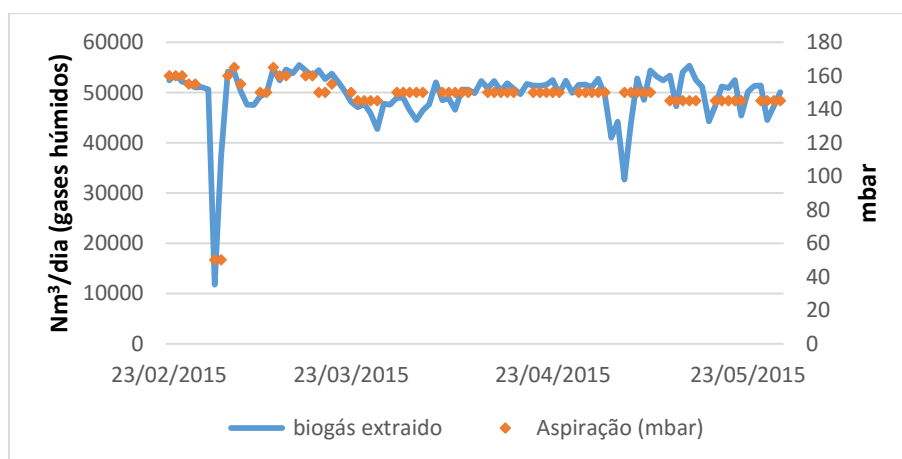


Figura 63 – Perfil de extração em caudal volumétrico (Nm3/dia) de gás de aterro em função da depressão (mbar).

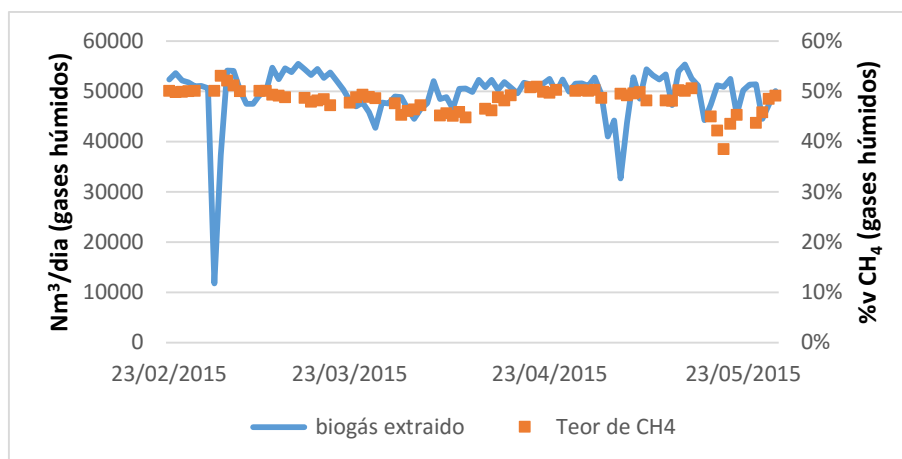


Figura 64 – Perfil de extração em caudal volumétrico (Nm^3/dia) de gás de aterro e concentração de metano ($\%v$, gases húmidos).

As Figuras 63 e 64 refletem o padrão de extração de gás de aterro desde 23 de Fevereiro até 28 Maio de 2015. A Figura 63 representa a quantidade de biogás extraído correlacionado com depressão exercida sobre o aterro. A Figura 64 correlaciona o volume de gás de aterro extraído com a concentração de metano medido nos gases húmidos. É necessário destacar que as amostras da depressão da concentração de metano foram pontuais, ou seja, uma medição diária. É necessário sublinhar a existência de flutuações ao longo do dia nestes parâmetros.

Da análise das Figuras 63 e 64 é necessário focar em dois pontos importantes. Primeiro a variação do volume extraído está dependente da potência definida nos motores e por vezes, é necessário adequar a potência instantânea de maneira a que a depressão não cause perturbações para o aterro. Segundo ponto importante, os reatores biológicos são sensíveis a choques provocados pela depressão e os principais indicadores são o aumento da concentração de oxigénio e depleção da concentração de metano.

Considerando que durante o período de análise foram observadas algumas variações na depressão exercida sobre o aterro e o efeito foi o mencionado anteriormente, aumento da concentração de oxigénio e depleção da concentração de metano. No entanto, é necessário destacar que o aumento da depressão está por vezes relacionada com a acumulação de condensados na linha, levando à redução ou obstrução momentânea da secção da extração causando flutuações, originando a paragem dos motores causadas por flutuações na admissão de combustível.

3.2.5 Mapeamento das áreas de produção do Aterro de Sermonde

Este trabalho foi elaborado com o intenção de determinar as áreas ativas em termos de produção de biogás e catalogar os drenos e poços existentes. Durante o período de estágio, apenas foi possível catalogar e delimitar as áreas na superfície do aterro e realizar o mapa explanado na Figura 65.

Este trabalho teve como objetivo, determinar as áreas com menor índice produtivo para que em projectos futuros sejam aplicados poços na expectativa de potenciar a extração e o aproveitamento energético de biogás gerado em aterro.

Neste projecto, foram utilizados três instrumentos de medição, um analisador de gás, uma anemómetro portátil e um termómetro infravermelhos. Com estes equipamentos foram determinados para 108 pontos de medição a composição do gás de aterro, subpressão, velocidade, e temperatura do gás para calcular o caudal de biogás em todos os pontos e posteriormente delimitar as áreas e conforme os resultados obtidos.

No anexo III, encontra-se catalogado os drenos e poços e a respetiva localização nas áreas de forma mais detalhada.



Figura 65 – Delimitação das áreas de produtividade de gás de aterro.

A Área 2 é claramente a mais produtiva em termos de gás de aterro, fornecendo cerca de 400 Nm³/h de gases húmidos, consistindo também numa das áreas com maior densidade de drenos, ou seja a extração torna-se mais eficiente e o volume de abrangência do reator torna-se superior, denota-se também, que maior densidade de drenos existe também uma distribuição da subpressão sobre o reator biológico. A Área 2 é também considerada a mais produtiva pelo facto de ser a frente de trabalho e cuja deposição de RSU é relativamente recente, por este motivo é registado um elevado caudal de biogás.

Área	Caudal de biogás (Nm ³ /h)
1	144,75
2	392,26
3	183,15
4	55,65
5	29,30
6	136,57
7	172,18
8	131,45
9	62,28
10	160,81

Tabela 8 – Caudal de biogás (Nm³/h, gases húmidos) relativamente a área definida.

3.3 Central de valorização Energética

3.3. Monitorização dos aspetos técnicos dos motores

A manutenção geral dos motores é determinante para a duração dos motores em termos laborais, efetivamente um motor GE Jenbacher atinge o limite de vida quando atinge as 40 000 horas de operação, começando a perder eficiência de conversão.

A Suldouro mantém este registo, pelo princípio dos operadores, como forma de prevenção para avarias de maior impacto resultantes em períodos mais prolongados de paragens. Os registos efetuados referem-se especialmente a parâmetros de manutenção como datas de revisões, tempo de laboração das velas, paragens e causas e substituição de componentes.

Embora os aspetos técnicos não tenham sido monitorizados sistematicamente durante o período de estágio, foram realizadas consultas de forma a perceber o tipo de intervenções e regulações necessárias para manter um motor operacional. A paragem de um motor não gera perturbação significativa em termos de produção de energia elétrica pela razão de que a Suldouro adquiriu um motor de reserva para eventuais intervenções, portanto, logo qualquer paragem é compensada pela entrada em funcionamento do motor de reserva.

Os motores de combustão interna estão equipados com um sistema de gestão e monitorização DIANE XT (Figura 66).



Figura 66 – Sistema de gestão e monitorização do motor [<https://www.ge-distributedpower.com/products/product-features/dia-ne-xt4-engine-management-system>]

3.3.2 Monitorização dos sistemas de conversão de energia elétrica

Como forma de determinar a eficiência dos motores da central de valorização energética na conversão de biogás em energia elétrica, foi calculado o rendimento elétrico, em que a Suldouro tem o particular interesse em determinar. Um balanço energético típico de um motor de combustão interna é esquematizado na Figura 67.

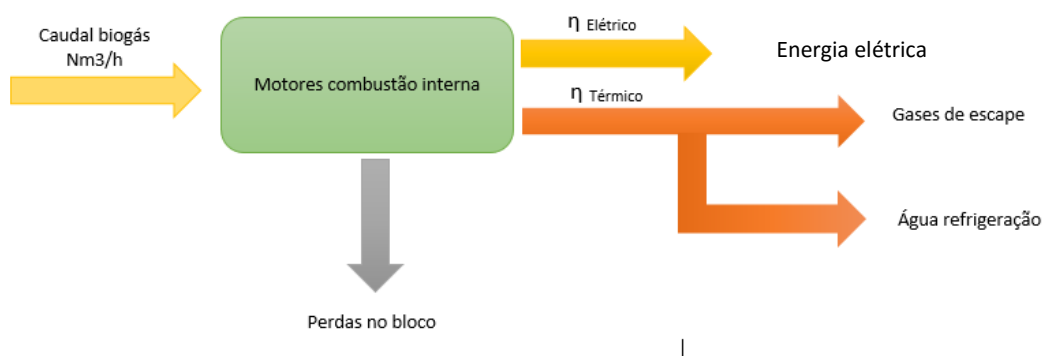


Figura 67 – Esquema de balanços energéticos dos motores de combustão interna.

3.3.3 Rendimento elétrico dos motores

Para determinar o rendimento dos motores foram elaborados registos num período de duas semanas dos caudais, em Nm³/h, admitidos pelos motores, composição do biogás e energia elétrica produzida por cada um dos motores em operação. Para determinar a energia fornecida aos motores foi utilizado o poder calorífico inferior (PCI) do metano de 35,9 MJ/Nm³.

$$E_{\text{fornecida}} (\text{kWh}) = (\dot{m} \text{ biogás (Nm}^3/\text{h)}) \times \text{Teor de metano (\%v)} \times \text{PCI Metano})/3600 \quad \text{Eq.7}$$

$$\eta = \frac{E_{\text{eletrica gerada}}}{E_{\text{fornecida}}} \times 100 (\%) \quad \text{Eq.8}$$

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

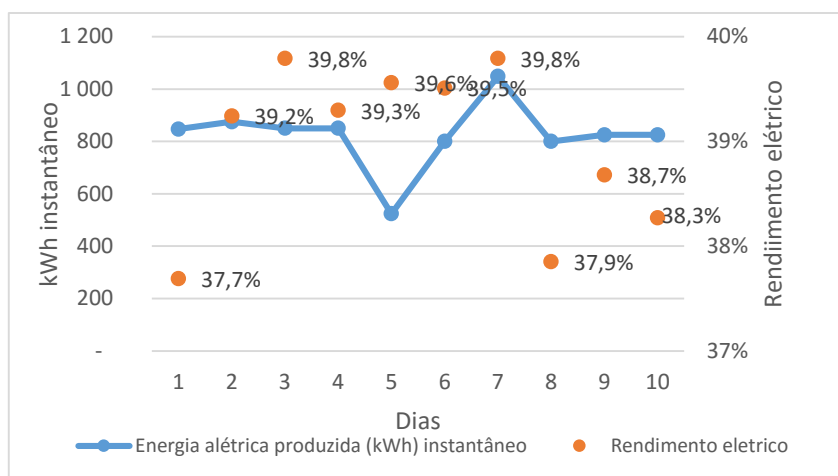


Figura 68 - Resultados rendimento motor 1

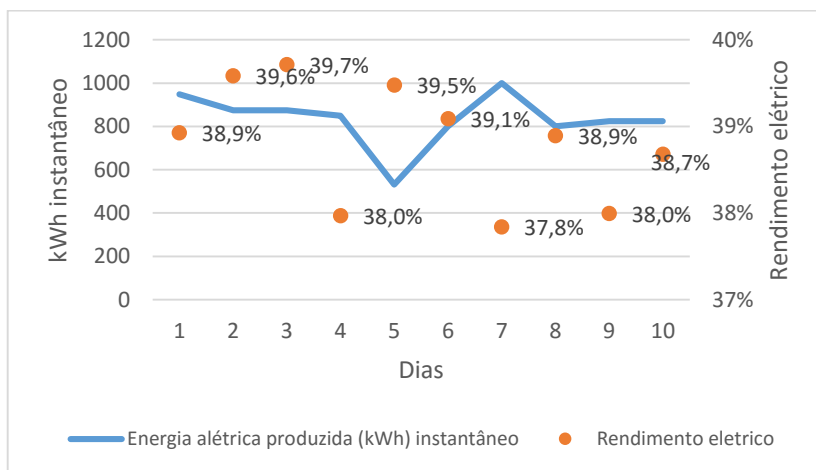


Figura 69 - Resultados rendimento motor 2

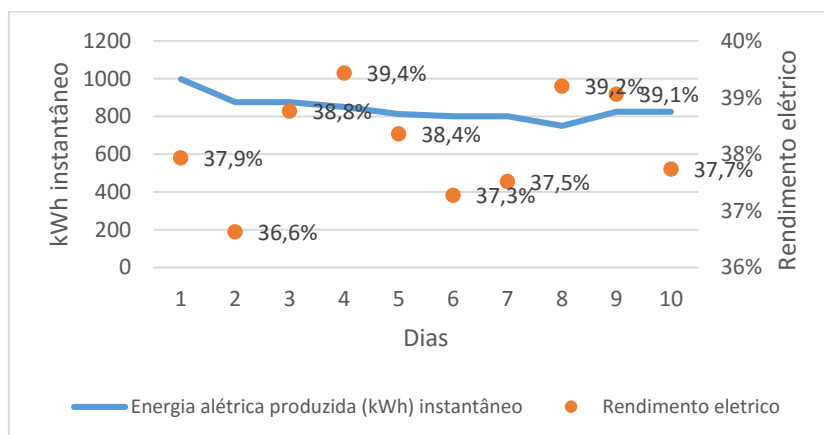


Figura 70 - Resultados rendimento motor 3

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

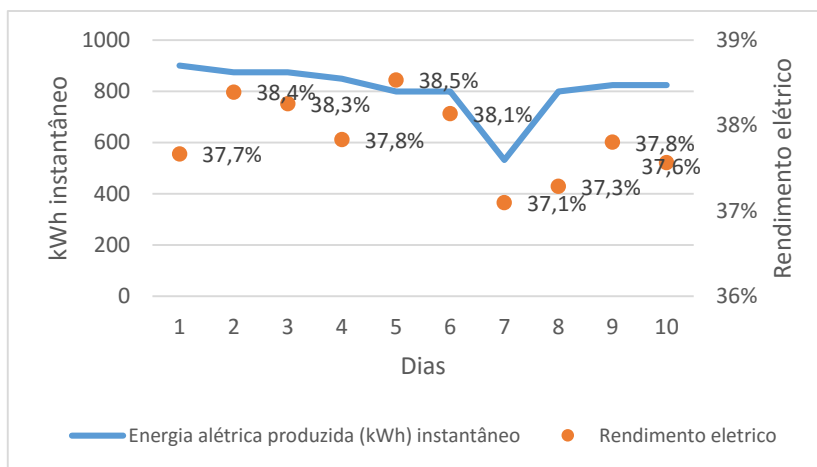


Figura 71- Resultados rendimento motor 4

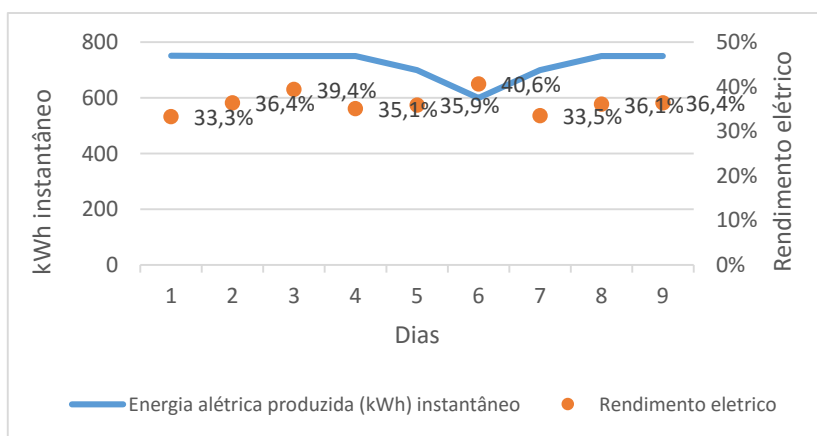


Figura 72 - Resultados rendimento motor CVO

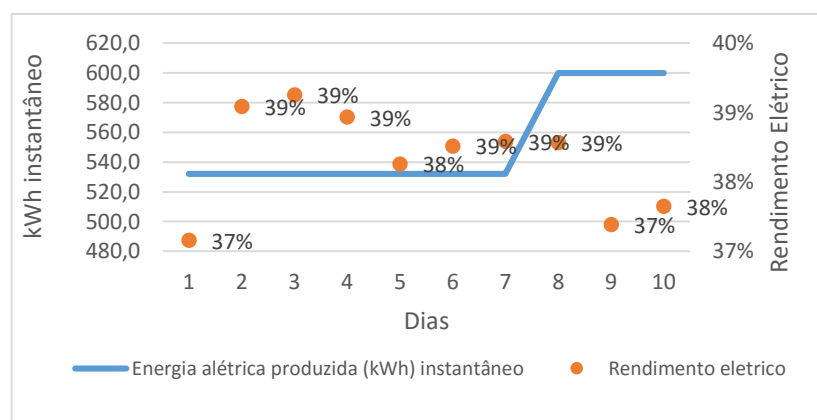


Figura 73 - Resultados rendimento motor 6

As Figuras 68, 69, 70, 71, 72 e 73 representam os rendimentos dos 6 motores que laboram na Suldouro, à exceção do motor 5, o motor de reserva, que durante o período de medição não estava a laborar. A base do estudo consistiu em determinar os rendimentos elétricos dos motores para a energia elétrica instantânea produzida. A energia elétrica produzida, geralmente, é lineares, à exceção dos períodos de manutenção ou quebra na qualidade e quantidade de biogás. Segundo o manual GE Jenbacher, os motores perdem 0,5% do rendimento por cada 1°C quando opera sobre temperaturas ambiente acima dos 25°C. As medições foram elaboradas as 9h30 min e a uma temperatura ambiente na ordem dos 18-20 °C.

Tabela 9 – Rendimentos elétricos médios dos motores

Motor	1	2	3	4	CVO	6
Rendimento Médio	39,0%	38,8%	38,2%	37,9%	36,3%	38,3%

Segundo os dados fornecidos pelo fornecedor, os motores da Suldouro apresentam um rendimento elétrico, entre os 37,6 % e os 39,2%. De facto, os valores médios obtidos nas medições durante o período de estágio incluem rendimentos entre os 37,9% e os 39% à exceção do motor da CVO que apresenta valores inferiores aos outros, com cerca de 36,3 % de rendimento elétrico, conforme o demonstrado na tabela 9.

3.3.4 Monitorização da produção de energia elétrica

A monitorização da produção de energia elétrica a partir da combustão do biogás surge na sequência do trabalho realizado anteriormente. Esta variável é um indicador de desempenho energético da Suldouro, e a evolução crescente da produção de energia elétrica não é só encarado como uma fonte de receita para a empresa, mas também como um contributo para a injeção de energia elétrica de origem renovável na rede; o quantitativo de energia elétrica produzida tem potencial para satisfazer as necessidades energéticas de 10% dos habitantes dos municípios de Vila Nova de Gaia e Sta. Maria da Feira.

Para efeito de monitorização da produção de energia elétrica, foram efetuadas medições diárias através das contagens de energia produzida nos motores 1,2,3,4, 6 e CVO, realizadas em períodos de 24 horas durante o período de estágio e apresentados nas Figuras 74 a 79

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

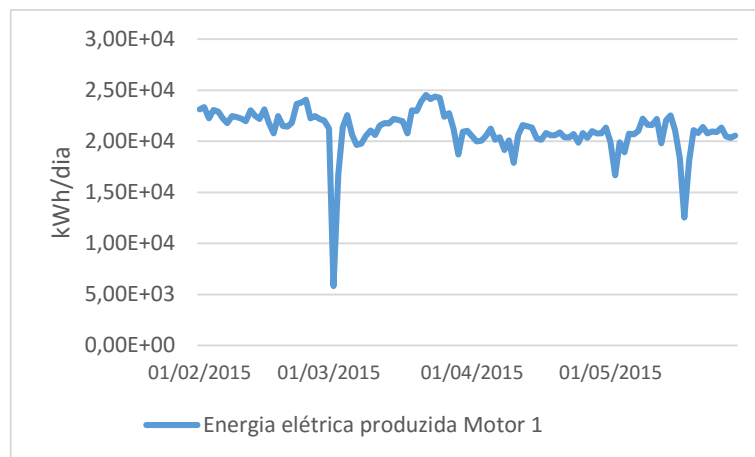


Figura 74 – perfil de produção de energia elétrica motor 1

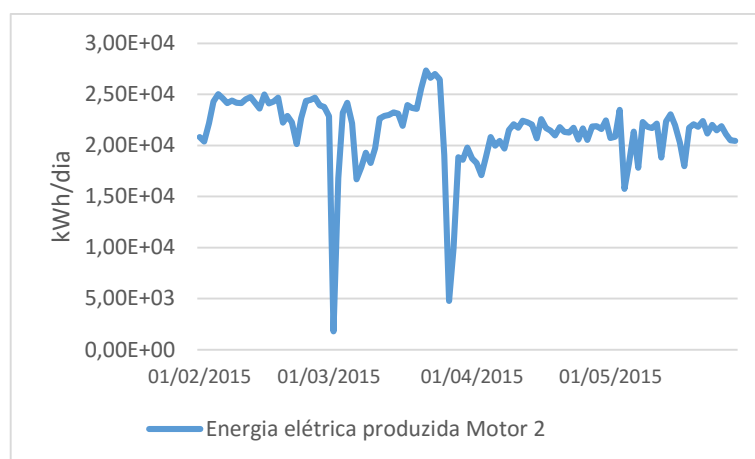


Figura 75 – Perfil de produção de energia elétrica motor 2

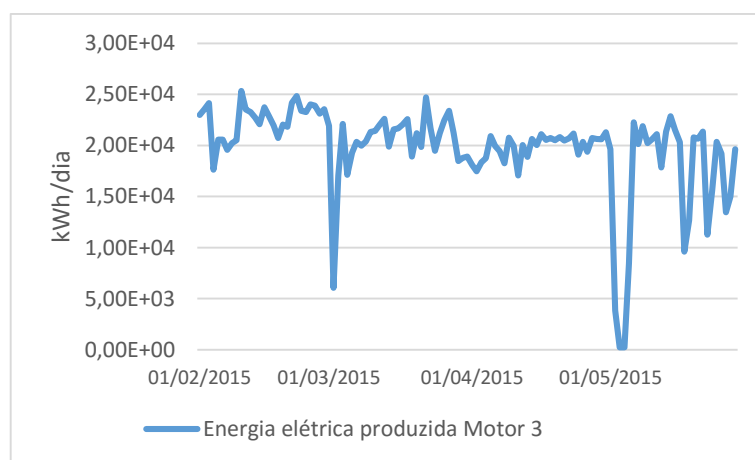


Figura 76 – Perfil de produção de energia elétrica motor 3

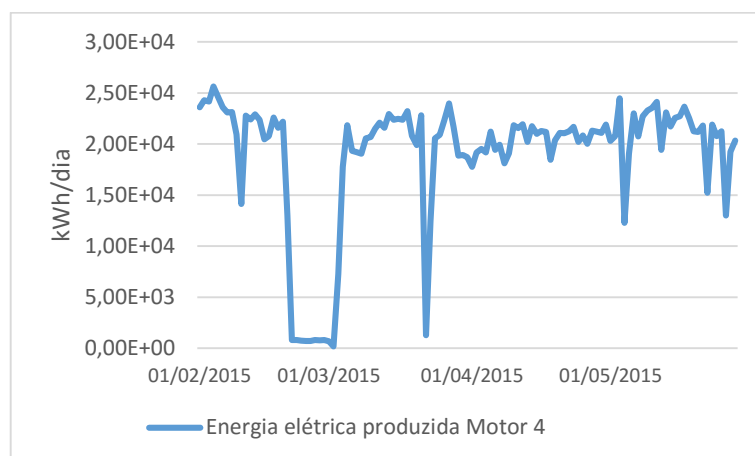


Figura 77 – Perfil de produção de energia elétrica motor 4

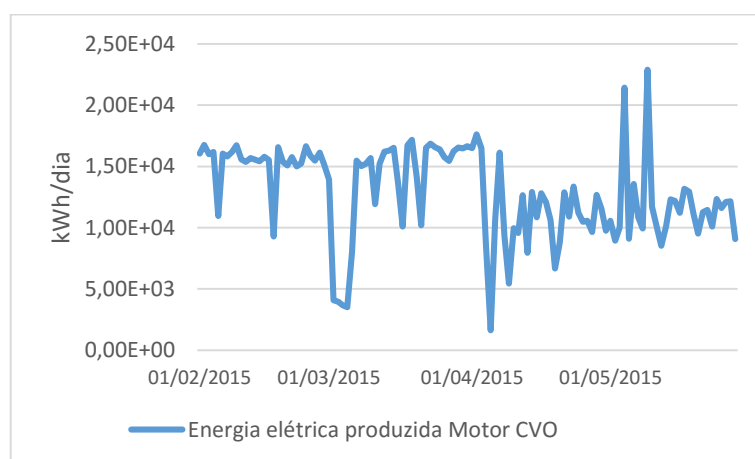


Figura 78 – Perfil de produção de energia elétrica motor CVO

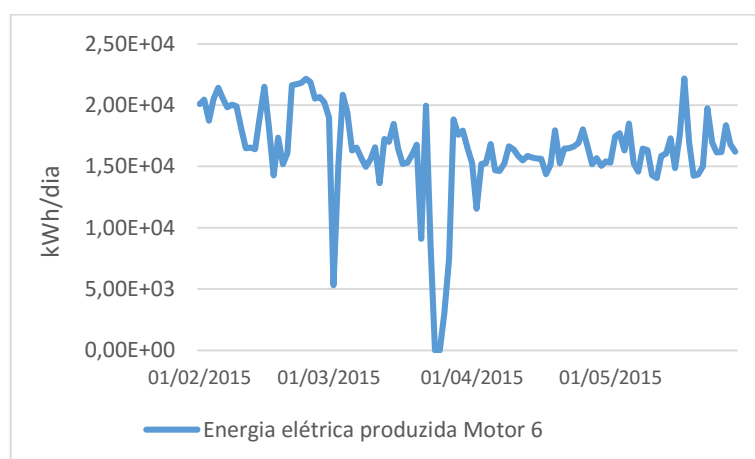


Figura 79 – Perfil de produção de energia elétrica motor 6

Em termos globais, os motores têm um comportamento linear, quando a questão é focada sobre a produção de energia elétrica. Efetivamente são registadas quebras na produção de energia elétrica, em alguns dos motores, a isto deve-se a períodos de manutenção.

Embora nestes registos sejam identificadas essas quebras, em termos energia injetada na rede, não ocorrem, visto que existe o motor de reserva, que colmata os períodos de manutenção dos restantes motores.

Cada motor, à exceção do motor da CVO, produz aproximadamente $20 \text{ MWh} \cdot \text{dia}^{-1}$. O motor da CVO, até 4 de abril funcionava com uma mistura de biogás de aterro e biogás da CVO, posteriormente, foram criadas infraestruturas, para operar, excecionalmente, com gás da CVO. Desta forma a figura 78 referente ao perfil da produção de energia elétrica da CVO. É registada uma quebra abrupta da produção a partir do dia 4 de abril. Embora tenha sido registado uma quebra, atualmente o motor opera apenas com o caudal de biogás proveniente da central, o que anteriormente não seria possível, uma vez que a produção de biogás era relativamente inferior, levando a sucessivas paragens do motor.

O ORC utiliza uma fonte térmica, neste caso, gases de escape dos motores, e um fluido de trabalho, o tolueno, que por aquecimento, evaporação e sobrepressão, expande e comprime acionando a turbo gerador para produção de energia elétrica.

A Suldouro tem dois equipamentos ORC, como o demonstrado na figura 80 o primeiro recebe gases de escape dos motores 1 e 2, e o segundo admite gases de escape dos motores 3 e 4. Em tempos, a Suldouro encomendou uma medição para determinar os balanços. Os dados foram utilizados, excecionalmente, para demonstrar um balanço energético no ORC. Os ORC têm um rendimento para produção de energia elétrica aproximado a 7%.

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

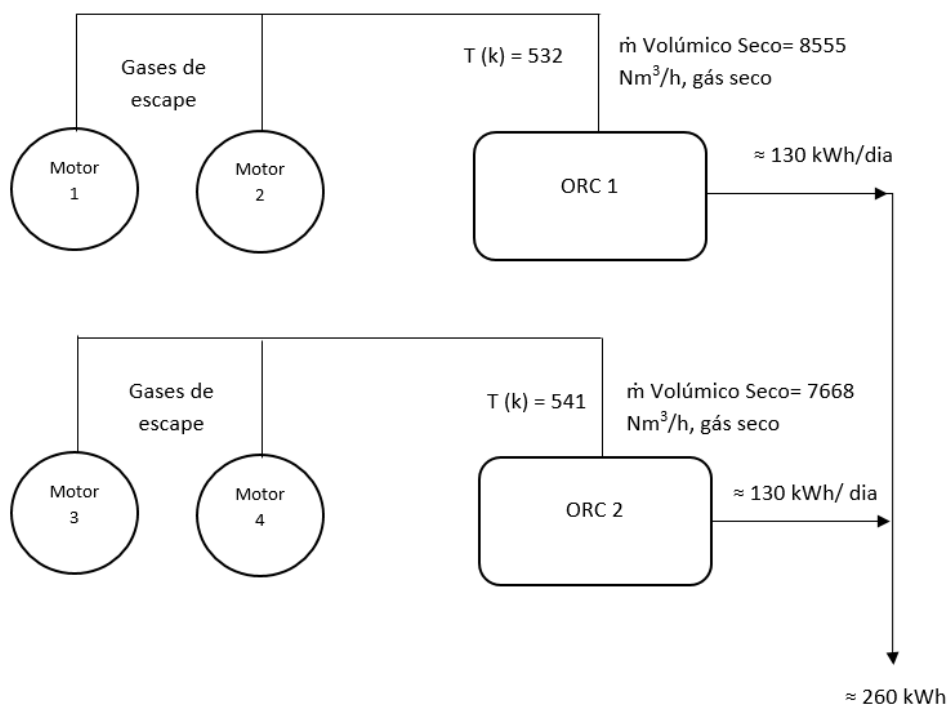


Figura 80 – Esquema do sistema de valorização energética dos gases de escape dos motores 1,2,3,4 e utilizando o sistema ORC (Dados:Suldouro).

Com base nos dados, os gases de escape entram no ORC a uma temperatura, entre os 532 e os 541 k e um caudal (Nm^3/h , ar seco) entre os 7500 e os 8600. Dentro deste balanço, a produção de eletricidade varia entre os 120 e os 130 kWh, totalizando uma média de $3050 \text{ kWh} \cdot \text{dia}^{-1}$ cada ORC, a Figura 81 representa a produção diária de energia elétrica, durante o mês de Março.

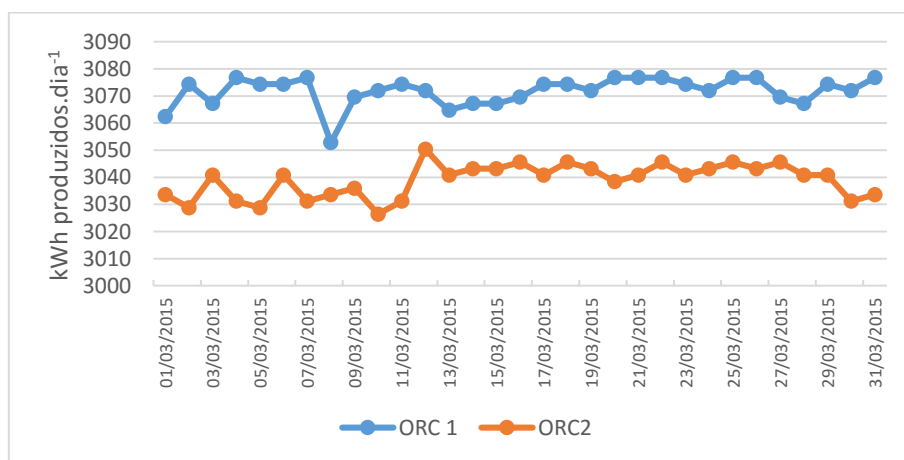


Figura 81- Perfil de produção de energia elétrica ORC's.

A produção de eletricidade no ORC é praticamente linear, com poucas variações, as existentes estão diretamente correlacionadas com quebras no caudal de gases de escape provenientes dos respetivos motores

3.3.5 Aterro e Central de Valorização Orgânica

A monitorização da energia elétrica rede rege-se pelas leituras dos contadores de energia injetada na rede, uma vez, que toda a energia elétrica produzida é vendida. A energia elétrica produzida a partir de biogás de aterro e de biogás da CVO são monitorizados em contadores independentes, os motores 1,2,3,4,5 e 6 são dedicados exclusivamente para aterro e um sétimo motor é destinado apenas para a CVO.

A figura 82 representa a produção de energia elétrica resultante da combustão do gás extraído do aterro desde fevereiro até junho de 2015.

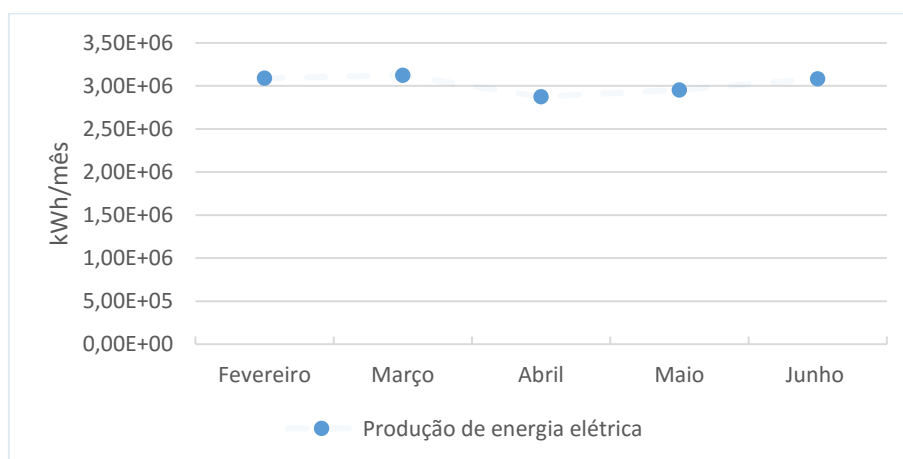


Figura 82- Energia elétrica produzida a partir do biogás de aterro injetada na rede elétrica.

Pela análise da Figura 82 são denotadas duas flutuações acentuadas. A primeira foi registada entre o final do mês de março e o final do mês de abril, consistindo numa quebra abrupta na produção de energia elétrica, consequência de um período de exigência excessiva de extração de gás de aterro durante o mês de Março para atingir objetivos de produção, originando a depleção da concentração de metano e excesso de oxigénio na composição do gás de aterro. Como forma de recuperar a produção foi necessário reduzir a potência de operação dos motores e consequentemente reduzir a depressão sobre o aterro. A segunda flutuação é denotada desde o

mês de abril até junho em que a produção de energia elétrica registou valores semelhantes ao mês de fevereiro, a este acréscimo está associado ao período em que foi controlada a extração de gás de aterro e selado o ultimo alvéolo do aterro. A conjugação destes dois fatores foram preponderantes para o incremento da produção em relação ao mês de abril.

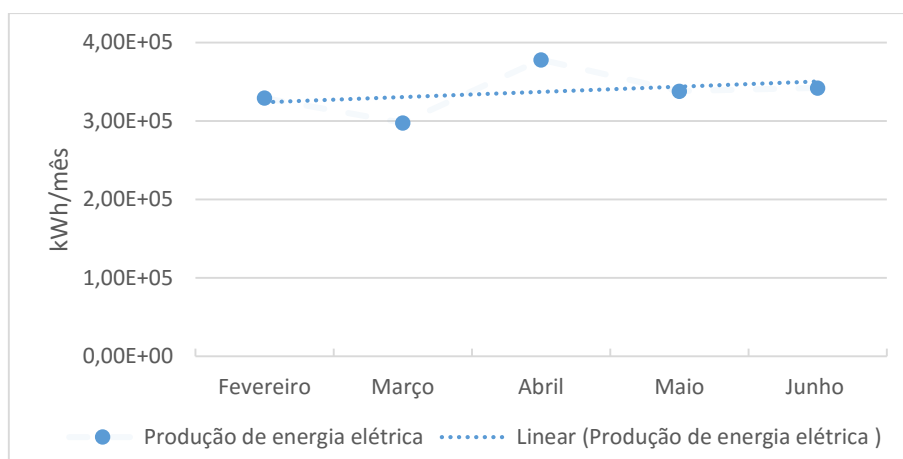


Figura 83- Energia elétrica produzida a partir do biogás de aterro injetada na rede elétrica

A produção de energia elétrica da central de valorização orgânica atingiu, durante o período de estágio, os valores mais altos registados desde 2013. Ao incremento e à tendência de crescimento deste parâmetro estão associadas as medidas de otimização implementadas. É perceptível pela análise da figura 83 um crescimento durante o mês de abril na produção de energia elétrica e um decréscimo no mês de maio, a esta flutuação deve-se ao facto de haver instabilidade nos processos determinados nas medidas de otimização levando ao decréscimo da produção. Não obstante as flutuações, é importante sublinhar que a central de valorização teve um aumento na produção entre 20 e 25% em relação ao mês de janeiro e um crescimento dentre 35 e 40% em relação ao mesmo período em 2014. O aumento da produção de energia elétrica na CVO está associado às medidas de otimização implementadas pela Suldouro ao longo do período de estágio.

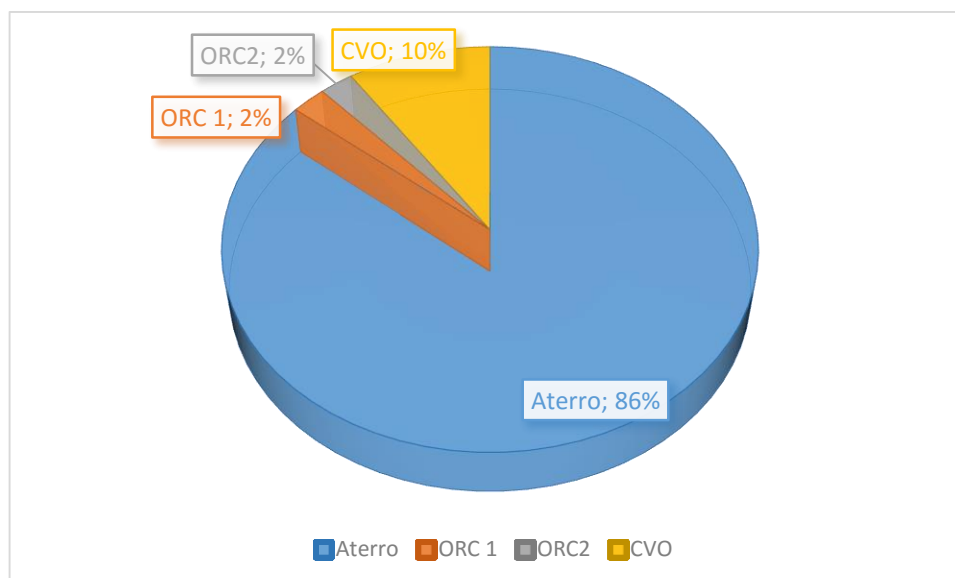


Figura 84- Contribuição dos sistemas na produção de energia elétrica.

O facto de ser possível medir a produção de energia elétrica por sistema, foi elaborado a Figura 84 para representar o impacto que cada um dos sistemas tem na produção total de energia elétrica, permitindo efetuar uma comparação.

O aterro é a principal fonte de energética, representado 86% da energia elétrica produzida, seguindo-se da central de valorização energética com cerca de 10% e os ORC apenas 4%. Comparando os sistemas de produção de biogás é denotada uma disparidade significativa, sendo uma razão de 1:8,6 entre aterro e CVO. Esta razão deve-se essencialmente á quantidade de resíduos depositados, à permanência do resíduo em aterro e ao sistema de drenagem de biogás.

Não obstante, o desvio da matéria orgânica de aterro para a central de valorização orgânica, reduz significativamente o desempenho de produção de biogás de aterro. Dada a obrigatoriedade deste procedimento, tendo em consideração as metas para a valorização da fração orgânica dos RSU é necessário desenvolver soluções e tecnologias para otimizar a produção de biogás em centrais de valorização orgânica.

3.4 Consumos energéticos

3.4.1 Consumo de energia elétrica da CVO

A central de valorização orgânica tem necessidades energéticas abruptas, principalmente, em termos de energia elétrica. Com base nos registos de energia elétrica produzida pela central e a faturação da energia consumida, estimou-se o balanço entre a produção e o consumo, conforme indicado Tabela 10 a título de exemplo para 5 meses.

Tabela 10 – Balanço Produção consumo de eletricidade da CVO.

	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho
Produção eletricidade (kWh)	329 268	297 550	377 973	325 206	336 096
Consumo eletricidade (kWh)	180 869	195 364	190 735	194 697	183 827
Balanço (%)	55	66	50	60	55

Com os valores obtidos, assere-se que entre 55 e 60% da energia produzida, é consumida para satisfazer as necessidades energéticas da operação, considerando o balanço entre a energia produzida e a energia consumida.

Como forma de dar a conhecer os principais equipamentos consumidores, foi utilizado um estudado efetuado pelo ISQ, encomendado pela Suldouro. A figura 85 representa o impacto, em percentagem, que cada equipamento da central de valorização orgânica tem no consumo final de energia elétrica.

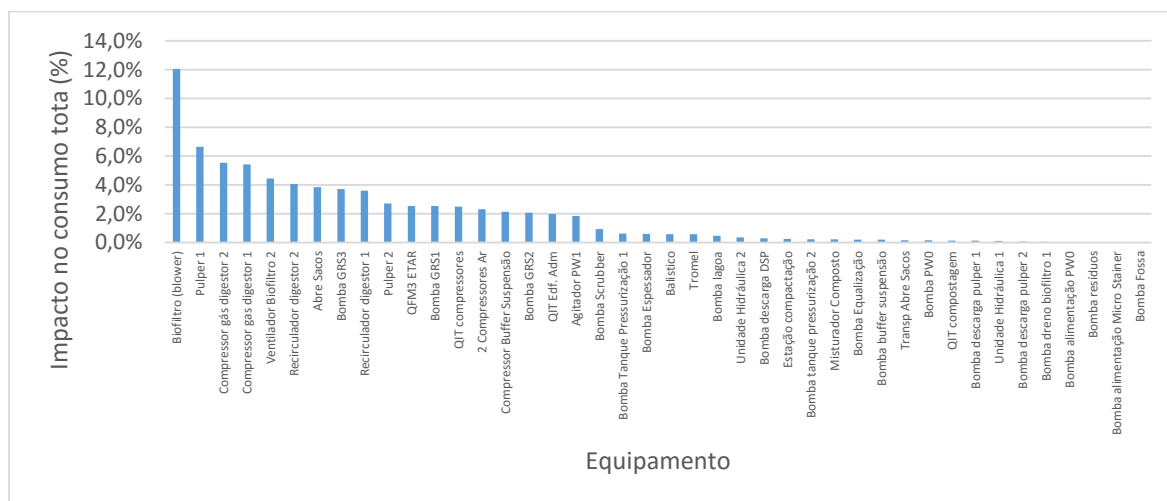


Figura 85 - Consumo de energia elétrica por equipamento da CVO (Dados: Suldouro).

Conforme o representado, verifica-se que os principais consumidores energéticos são os biofiltros, os compressores, abre sacos e as bombas de recirculação da suspensão. Efetivamente são os principais consumidores, dado o período de laboração destes equipamentos, cuja operação é sistemática.

3.4.2 Consumo de energia térmica (aquecimento)

A Suldouro utiliza um contador de entalpia para registar o consumo de energia térmica nas instalações. A energia térmica utilizada para o aquecimento das instalações e dos digestores é proveniente do aproveitamento da água utilizada na refrigeração dos motores para aquecer a água de um circuito fechado complementar. A transferência de calor é efetuada com recurso a um permutador de calor instalado no exterior do motor. O transporte da energia térmica é efetuado através de um circuito fechado de água, este mesmo circuito é composto por um tubo isolado, de forma, a evitar perdas energéticas significativas.

O contador de entalpia está equipado com um sensor de temperatura de saída, um sensor de temperatura de retorno e uma unidade de medida volumétrica. Através dos valores de medição recolhidos, das constantes do fluído é estimado o balanço energético e através do microprocessador integrado calcula a quantidade de calor consumido.

Embora a Suldouro proceda à contagem mensal deste parâmetro como forma de monitorizar a energia térmica consumida, foi efetuado uma contagem destes valores com o objetivo a análise da quantidade de energia requerida para satisfazer as necessidades de aquecimento das instalações. Foi demonstrado na Tabela 11, um período de medições de 10 dias, para efetivamente, ter a noção das necessidades energéticas diárias. Com base neste estudo, assere-se que para o mês de maio, cujas temperaturas ambiente variam entre os 20 e os 25°C, são necessários cerca de 1500 a 2000 kWh_{th}/dia para satisfazer o aquecimento das instalações e os permutadores responsáveis pela manutenção da temperatura nos digestores. Assere-se também, que pela estimativa, para os meses com temperaturas amenas como maio, são consumidos cerca de 45 a 55 MWh_{th}/mês. Com base no histórico os meses com temperaturas mais baixas, as necessidades energéticas duplicam para valores entre 130 e 150 MWh_{th}/mês.

Data	Medição h	Contagem kWh_{th}	Consumo kWh_{th}
18 Maio	09:30	4181262	0
19 Maio	09:30	4183424	2162
20 Maio	09:30	4185304	1880
21 Maio	09:30	4186856	1552
22 Maio	09:30	4188479	1623
25 Maio	09:30	4191422	2943
26 Maio	09:30	4193093	1671
27 Maio	09:30	4194675	1582
28 Maio	09:30	4196557	1882
29 Maio	09:30	4198480	1923

Tabela 11- Amostra de contagens de energia térmica consumida durante um período de 10 dias a título de exemplo.

Esta é considerada uma medida de sustentabilidade energética com um peso significativo dada a necessidade de energia térmica requerida na Suldouro, incitando ao aproveitamento do calor gerado pelos motores.

Capítulo 4 - Conclusão

Na globalidade o estágio na Suldouro foi deveras gratificante, no enriquecimento do conhecimento e no desenvolvimento de competências, criar relações interpessoais, lidar diariamente com diferentes perspetivas, encarar diversas problemáticas e adquirir a capacidade de lidar com inúmeros imprevistos, acima de tudo este estágio foi deveras gratificante pela confiança depositada para desenvolver projetos e intervir no sistema.

A CVO da Suldouro é potencial energético ainda por ser explorado. Efetivamente, durante o período de estágio foi possível acompanhar a ascensão deste sistema, um incremento substancial da produção de biogás. Um aumento significativo na ordem dos 20 a 25% em relação ao registado no histórico de produção. Os três fatores que contribuíram para este acréscimo focaram-se em dar maior atenção aos processos e manter a operacionalidade da central, a monitorização dos parâmetros de estabilidade e adequação dos parâmetros de operação e implementação das medidas de otimização.

Durante o estágio foi importante correlacionar a análise dos parâmetros de estabilidade, nomeadamente, pH, AGV, alcalinidade, NH_4^+ e sólidos totais e voláteis, com os métodos de operação praticados para encontrar os efeitos e as causas de fatores inibitórios do desempenho da digestão anaeróbia. Em termos dos parâmetros de estabilidade foram registados e definidos os intervalos aos quais o sistema reagiu positivamente ao indicador de produção. Os valores apresentados foram definidos como ótimos para o sistema pela reincidência nos registos de maior produção de biogás.

Em termos de operação é necessário garantir e estabilizar os seguintes procedimentos:

1. Garantir a produção de aproximadamente 320 m^3 de suspensão, desprezando o efeito do espessamento, ou o equivalente a 10 ciclos completos de *Pulper* diariamente. Desta forma, irá garantir a alimentação diária de 150 m^3 de suspensão e reter a quantidade de suspensão necessária para o processo de maturação.
2. Garantir um espessamento de suspensão entre os 62-70%, parâmetro de operação dos espessadores, para garantir uma suspensão com um teor de sólidos entre 8-10%
3. Equilibrar a alimentação com a desidratação, efetivamente, alimentar os 150 m^3 determinados, e desidratar aproximadamente 210 m^3 , sem oscilações significativas neste volume, desta forma a Suldouro irá tirar maior rentabilidade da suspensão introduzida, pela redução do choque biológico criado ao remover parte da suspensão ativada com microrganismos metanogénicos e de carga orgânica valorizável.

Quanto às medidas de otimização implantadas é crucial manter um regime de alimentação continua aos digestores, evitando quebras neste fator. Um caudal médio diário na ordem dos $3,1 \text{ m}^3$

suspensão/hora. digestor irá garantir uma alimentação diária de 75 m^3 e um tempo de retenção hidráulico em ≈ 27 dias. O cumprimento deste parâmetro é efetivamente importante pela redução do choque provocado pela desidratação nas comunidades biológicas. A continuidade deste procedimento pode refletir acréscimos na produção entre os 10 e 15%.

Em termos de regulação do tanque de suspensão é importante reter a suspensão produzida durante um período de 80 a 90 horas às condições de pH entre 5 e 5,5, segundo os valores obtidos, com uma presença de oxigénio relativamente baixa, entre os 1,5 e 2% para garantir o posterior desenvolvimento de bactérias acetanogénicas. O tempo de retenção não deverá ser superior a 6 dias e o pH não deverá ser superior a 6, nestas condições poderá ocorrer o risco de produção de metano neste tanque. Com esta medida, a Suldouro conseguiu introduzir suspensão num estado de maturação superior aumentando a eficiência de conversão da matéria orgânica biodegradável em biogás nos digestores.

Por fim, a ausência de oxigénio permitiu criar as condições necessárias para o crescimento de bactérias metanogénicas num menor período de tempo, denotado pelo aumento da taxa de degradação da matéria orgânica, esta afirmação foi denotada pela redução acentuada no teor de sólidos introduzidos.

A ausência de oxigénio e a estabilidade da alimentação de suspensão em regime contínuo de conferiram condições adequadas para o crescimento de bactérias metanogénicas. A taxa de crescimento de bactérias metanogénicas é superior em condições de anoxia, a alimentação de suspensão em regime contínuo reduz o choque no balanço de carga orgânica provocado pela desidratação e a suspensão devidamente maturada confere ao sistema maior facilidade na degradação da fração orgânica pela redução do número de fases. Estas medidas impuseram também ao sistema uma correção dos parâmetros de estabilidade, reduzindo os efeitos de inibição.

Será de destacar o facto de que durante o mês de Fevereiro que a quantidade de biogás gerada era aproximadamente $30\text{--}33 \text{ Nm}^3 \text{ biogás/ m}^3 \text{ suspensão}$, e com as medidas de otimização aplicadas em simultâneo esse valor estabilizou entre os 43 e os $45 \text{ Nm}^3 \text{ biogás/ m}^3 \text{ suspensão}$ incrementado a produção de biogás entre 20 e 25%.

Quanto ao aterro, efetivamente, pode-se concluir que o trabalho de uma equipa empenhada e consciente revelam-se em resultados. As tecnologias desenvolvidas, nomeadamente o sistema de drenagem de biogás conjugado com a monitorização e regulação dos mesmos, resulta num elevado grau de aproveitamento dos recursos gerados. O aumento do volume do reator abrangido pelos drenos permite a extração de uma elevada porção de biogás, reduzindo a depressão exigida sobre o aterro.

Em termos das experiências monitorizadas no aterro, é possível concluir que, há muito potencial orgânico desperdiçado na central de valorização orgânica que poderá ser convertido em biogás, garantindo a degradação da matéria dificilmente biodegradável, prolongando o aproveitamento dos recursos. Para terminar a apreciação ao aterro, é perceptível que a produção de biogás em aterro encontra-se num ponto de inflexão tanto na quantidade de biogás como na composição e o mesmo se irá refletir na produção de eletricidade, pelo escoamento de recursos orgânicos, devido ao desvio de matéria orgânica para a central de valorização orgânica desde 2012 refletiu num decréscimo abrupto na produtividade, não compensada pela produção de biogás na CVO, eventualmente, aplicando as experiências elaboradas poderá ser recuperado parte do potencial desviado e prolongar a vida útil do aterro.

Efetuada uma comparação entre a implementação de furos verticais e horizontais, os horizontais concernem uma maior expectativa em termos de extração dada a profundidade abrangida e a menor sensibilidade à captação de oxigénio. Os poços verticais, com base nos dados, apresentam maior produtividade, contudo o volume de abrangência é reduzido e a tendência a absorção de oxigénio é superior, retardando o processo de digestão anaeróbia. Uma outra vantagem dos poços horizontais deve-se a inclinação atribuída, favorecendo a lixiviação dos condensados. Tendo em consideração estes aspetos e da evolução dos poços horizontais estes demonstram ser, efetivamente, uma potencial medida de reabilitação das áreas menos produtivas.

O mapeamento efetuado do aterro, a delimitação das áreas mais e menos produtivas, permitiu determinar a quantidade e a qualidade de biogás a ser extraído. Com este trabalho pode-se eventualmente, determinar uma estratégia de implantação de poços ou outras medidas de reabilitação das áreas aparentemente menos produtivas.

Quanto à Central de Valorização energética é possível concluir, que a operacionalidade e o desempenho desta instalação deve-se à monitorização e manutenção constante dos equipamentos e à otimização de recursos.

A produção de energia elétrica depende essencialmente, de fatores como este, a garantia de equipamentos operacionais. Pela monitorização elaborada ao rendimento dos motores da Suldouro, estes apresentam valores equivalentes aos catalogados pelo fornecedor, entre 38 e 39%, o que efetivamente é um feito, uma vez que parte dos motores começam a perder rendimento a partir das 40000 horas, considerando, por exemplo, que o primeiro motor da Suldouro tem cerca de 80000h.

De Fevereiro a Maio foram produzidos em média 3500 MWh de energia elétrica mensais dos quais, 96% da energia elétrica produzida é fruto da conversão de biogás através dos motores de combustão interna de ciclo Miller, dos quais 86% da energia elétrica é produzida a partir do biogás

de aterro e 10% proveniente do biogás da CVO. Os restantes 4 % são provenientes do processo ORC, pelo aproveitamento do caudal gases de escape dos motores 1,2,3 e 4 como fonte térmica para aquecer um fluido de trabalho, o tolueno.

A Suldouro utiliza ainda como fonte térmica a água de refrigeração dos motores permutando o calor para um ciclo fechado que distribui a energia térmica para aquecimento das instalações e para o aquecimento dos permutadores de calor para garantir a temperatura dos digestores. Esta é uma das medidas de sustentabilidade energética com mais significado, dado que, para o aquecimento das instalações são necessários entre 1500 a 2000 kWh_{th}, totalizando cerca de 45 a 55 MWh_{th} nos meses mais quentes do ano, nos meses frios são consumidos cerca de 130 a 150 MWh_{th}.

Em termos de consumo de energia elétrica na CVO da Suldouro este fator representa cerca de 51 a 62 % da energia elétrica produzida. Os principais equipamentos responsáveis pelo consumo energético da CVO são os *pulpers*, abre-sacos, biofiltros, compressores, bombas de recirculação e equipamentos da ETAR, representando aproximadamente 60% dos consumos elétricos.

Capítulo 5 - Bibliografia

- [1] – PERSU - Plano estratégico de resíduos sólidos urbanos, Ministério do Ambiente, do Ordenamento do território e do Desenvolvimento Regional, 1ª edição, 2007
- [2] – Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, Heinz Prassl, Michael Köttner, Tobias Finsterwalder, Silke Volk, Rainer Janssen, Biogás Handbook, 1ª edição, University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, 2008, Teodorita Al Seadi, 18 Janeiro 2015, <http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>, [consulta:18 Janeiro 2015] ISBN 978-87-992962-0-0
- [3] – Hisham Khatib, IEA WorldEnergyOutlook2011— A comment, Energy Policy, vol. 48, 2012, pag 737-743, www.elsevier.com/locate/enpol , [consulta:16 Janeiro 2015]
- [4] Ponsá S, Gea T, Alern L, Cerezo J, Sánchez A. - Comparison of aerobic and anaerobic stability indices through MSW biological treatment process, Waste Management, Vol.12, 2008, [Consulta:12 Janeiro 2015]
- [5]-, Department for environment Food & rural affairs, Mechanical Biological treatment of municipal Waste, Fevereiro 2013, <https://www.gov.uk/government/organisations/departement-for-environment-food-rural-affairs> - 22 Janeiro 2015
- [6] –, Sérgio Ferreira, Nuno Afonso Moreira, Eliseu Monteiro, Bioenergy overview for Portugal, Biomass and BioEnergy vol.3 3 , 2009, pag.1567 – 1576 [consul: 13 Janeiro 2015]
- [7] - George Tchobanoglous, Frank Kreith, Handbook solid waste management, 2ª Edição, McGraw Hill Professional, 2002, [consulta:24 Fevereiro 2015], <https://nebm.ist.utl.pt/repositorio/download/2429> ISBN: 0071500340, 9780071500340
- [8]- Manual GE Jenbacher
- [9] – Manual TRI-O-GEN
- [10] - Lise Appels, Jan Baeyens, Jan Degre`ve, Raf Dewil - Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Progress in Energy and Combustion Science Vol. 34,2008, pag. 755–781, 2 Março 2015, www.sciencedirect.com: [consul: 22 Fevereiro 2015]

Anexo I – Procedimentos de laboratório

Medição de pH – Procedimento de laboratório

1. Recolha da amostra na recirculação da suspensão;
2. Transferir a amostra para um goblé de 150 mL;
3. Homogeneizar a solução;
4. Preparar o multiparamétrico e colocar a sonda de pH na amostra;
5. Medir e registar;

Medição dos Sólidos Totais – Procedimento de Laboratório

1. Recolha da amostra dos digestores;
2. Homogeneizar a amostras;
3. Transferir a amostra para um cadinho previamente tarado e calcinado, com auxílio de uma proveta;
4. Pesar o cadinho com a amostra na balança analítica e registar;
5. Colocar o cadinho na estufa, a uma temperatura de 105°C durante 24 horas para garantir a remoção de toda a humidade;
6. Pesar o cadinho com a amostra seca, registar e determinar os sólidos totais de acordo com as seguintes equações;

$$ST(mg / l) = \frac{Peso1 - Tara}{Va(ml)} \times 10^6 \quad \text{Eq.9}$$

Peso 1 – Massa do cadinho + amostra seca a 105°C (g)

Tara – Massa do cadinho (g)

Va – Volume de amostra (ml)

$$ST(\%) = \frac{Peso1 - Tara}{Pi - Tara} \times 100 \quad \text{Eq.10}$$

Peso 1 – Massa do cadinho + amostra seca a 105°C (g)

Tara – Massa do cadinho (g)

Va – Volume de amostra (ml)

Medição dos Sólidos Voláteis – procedimento de laboratório

1. Colocar o cadinho com a amostra seca na mufla, a uma temperatura de 550°C durante 4 horas;
2. Após o arrefecimento, pesar o cadinho com a amostra calcinada e registar
3. Determinar os sólidos voláteis de acordo com as equações

$$SV(mg/l) = \frac{Peso1 - Peso2}{Volumeamostra(ml)} \times 10^6 \quad \text{Eq.11}$$

Peso 1 – Massa do cadinho + amostra seca a 105°C (g)

Peso 2 – Massa do cadinho + amostra calcinada a 550°C (g)

Tara – Massa do cadinho (g)

Va – Volume de amostra (ml)

$$SV(\%) = \frac{Peso1 - Peso2}{P1 - Tara} \times 100 \quad \text{Eq.12}$$

Peso 1 – Massa do cadinho + amostra seca a 105°C (g)

Peso 2 – Massa do cadinho + amostra

calcinada a 550°C (g)

Tara – Massa do cadinho (g)

Medição Ácidos Gordos Voláteis e Alcalinidade

1. Recolha da amostra na recirculação suspensão
2. Centrifugar a amostra, durante 15 minutos a 4500 rpm
3. Retirar uma amostra de 20 mL de sobrenadante e colocar num goblé de 100 mL;
4. Colocar o goblé com um magneto, no agitador magnético e colocar a soda de pH ligada ao multiparamétrico;
5. Titular com solução de ácido sulfúrico a 0,1 N até o pH 5,00 (V1 mL) e 4,40 (V2 mL) e interpretar os resultados.

Cálculo da alcalinidade

$$TAC_{mgCaCO_3/L} = \frac{V1 \times 0,1 \times 50 \times 1000}{20} = V1 \times 250 \quad \text{Eq.13}$$

Cálculo de Ácidos Gordos Voláteis

$$VFA_{mgCH_3COOH/L} = [(V2 \times 1,66) - 0,15] \times 500 \quad \text{Eq.14}$$

Cálculo da capacidade tampão

$$rácio = \frac{VFA}{TAC} \quad \text{Eq.14}$$

Medição de Azoto Amoniacal (N-NH₄⁺) – Procedimento de laboratório

1. Recolha da amostra na recirculação suspensão
2. Centrifugar a amostra, durante 15 minutos a 4500 rpm
3. Colocar 0,1 mL de amostra centrifugada e diluída numa célula de reação
4. Adicionar uma dose de reagente NH₄-1K;
5. Agitar e deixar repousar durante 15 min (tempo de reação);
6. Medir no espectrofotómetro;

Anexo II – Monitorização CVO

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 12 – Parâmetros de operação dos digestores do mês de Fevereiro

FEVEREIRO	pH Digestor 1	Temp. Digestor 1 T ^o c	pH Digestor 2	Temp. Digestor 2 T ^o c	Alcalinidade Digestor 1 g CaCO ₃ /L	Alcalinidade Digestor 2 g CaCO ₃ /l	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Capacidade tampão Digestor 1	Capacidade tampão digestor 2
02/02/2015	7,34	31,2	7,33	32,7						
03/02/2015	7,339	34,1	7,348	35	7,15	7,175	0,506	0,506	0,07	0,07
04/02/2015	7,342	34,3	7,362	35,1						
05/02/2015	7,313	34,6	7,317	32,8	7,175	7,125	0,34	0,34	0,05	0,05
06/02/2015	7,321	34,5	7,329	33,7						
09/02/2015	7,336	34,1	7,343	33,7						
10/02/2015	7,26	32,1	7,24	33,9	7,375	7,225	0,34	0,506	0,05	0,07
11/02/2015	7,213	36,2	7,273	35,1						
12/02/2015	7,29	34,2	7,26	35,9	7,45	7,225	0,589	0,672	0,08	0,09
13/02/2015	7,27	35,2	7,32	31,6						
16/02/2015	7,255	33,5	7,293	35,3						
17/02/2015	7,306	30,1	7,372	29,6	7,375	7,5	0,672	0,34	0,09	0,05
18/02/2015	7,336	33,5	7,39	29,9						
19/02/2015	7,346	35	7,352	33,1	7,55	7,525	0,589	0,672	0,08	0,09
20/02/2015	7,461	33	7,432	32,5	7,575	7,625	0,589	0,589	0,08	0,08
23/02/2015	7,375	32,6	7,312	33,9						
24/02/2015	7,318	34,2	7,261	35,2	7,75	7,775	0,589	0,672	0,08	0,09
25/02/2015	7,3	33,9	7,28	35						

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 13 – Parâmetros de operação dos digestores do mês de Março

MARÇO	pH Digestor 1	Temp. Digestor 1 T°C	pH Digestor 2	Temp. Digestor 2 T°C	Alcalinidade Digestor 1 g CaCO ₃ /L	Alcalinidade Digestor 2 g CaCO ₃ /l	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Capacidade tampão Digestor 1	Capacidade tampão digestor 2
03/03/2015	7,367	30,6	7,349	31,3	7,875	7,8	0,672	0,755	0,09	0,10
04/03/2015	7,35	31,2	7,364	34,2						
05/03/2015	7,343	30,2	7,305	30,1	7,925	7,85	0,755	0,755	0,10	0,10
06/03/2015	7,304	35,1	7,325	31,2						
09/03/2015	7,333	35,6	7,316	35,5						
10/03/2015	7,318	35,4	7,284	35,1	8,05	8,025	0,755	0,506	0,09	0,06
11/03/2015	7,345	34,6	7,289	34,8						
12/03/2015	7,34	34,2	7,31	34,4	7,975	7,9	0,672	0,672	0,08	0,09
13/03/2015	7,35	34,4	7,325	34,4						
16/03/2015	7,411	30,5	7,389	31						
17/03/2015	7,39	31,4	7,29	31,7	7,95	7,875	0,672	0,672	0,08	0,09
18/03/2015	7,386	31,3	7,296	33						
19/03/2015	7,357	34,6	7,387	33,3	7,8	7,825	0,838	0,921	0,11	0,12
20/03/2015	7,361	34,2	7,363	33,1						
23/03/2015	7,428	31,9	7,365	31,2						
24/03/2015	7,352	34,5	7,379	33,6	7,675	7,875	0,838	0,921	0,11	0,12
26/03/2015	7,445	29	7,433	29	8,125	7,925	1,004	1,004	0,12	0,13
27/03/2015	7,395	32,6	7,398	33,6						
31/03/2015	7,388	33,1	7,364	32,8						

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 14 – Parâmetros de operação dos digestores mês de Abril

ABRIL	pH Digestor 1	Temp. Digestor 1 °C	pH Digestor 2	Temp. Digestor 2 °C	Alcalinidade Digestor 1 g CaCO ₃ /L	Alcalinidade Digestor 2 g CaCO ₃ /l	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Capacidade tampão Digestor 1	Capacidade tampão digestor 2
01/04/2015	7,39	33,8	7,377	34,9						
02/04/2015	7,346	33,8	7,36	34,7	8,35	8,425	0,921	1,004	0,11	0,12
06/04/2015	7,314	36,6	7,375	36,3						
07/04/2015	7,376	33,7	7,377	34,6	8,37	8,275	0,838	0,838	0,10	0,10
09/04/2015	7,366	33,6	7,363	35,3	8,3	8,325	0,755	0,755	0,09	0,09
10/04/2015	7,375	32,3	7,382	32,5						
14/04/2015	7,257	34,4	7,282	33,2	7,45	8,175	0,838	0,838	0,11	0,10
16/04/2015	7,298	34,5	7,324	34,1	7,27	8,225	0,589	755	0,08	0,09
21/04/2015	7,313	33,3	7,226	32,3	6,95	8,175	0,589	838	0,08	0,10
28/04/2015	7,285	34,6	7,37	34,4	6,57	7,92	0,506	838	0,08	0,11
30/04/2015	7,306	35,1	7,39	35,7	6,47	7,97	0,506	672	0,08	0,08

Tabela 15 — Parâmetros de operação dos digestores do mês de Maio

MAIO	pH Digestor 1	Temp. Digestor 1 °C	pH Digestor 2	Temp. Digestor 2 °C	Alcalinidade Digestor 1 g CaCO ₃ /L	Alcalinidade Digestor 2 g CaCO ₃ /l	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Agv Digestor 1 g CH ₃ COOH/L	Capacidade tampão Digestor 1	Capacidade tampão digestor 2
05/05/2015	7,262	32,9	7,355	31,7	7925	7875	506	672	0,06	0,09
07/05/2015	7,239	35,6	7,347	34,3	8575	7400	672	672	0,08	0,09
12/05/2015	7,278	34,4	7,401	35,1	8775	7000	506	506	0,06	0,07
14/05/2015	7,278	34,4	7,401	32,8	8200	7500	423	672	0,05	0,09
18/05/2015	7,353	35,4	7,346	33,7	8425	6525	672	589	0,08	0,09
22/05/2015	7,276	35,9	7,31	35	8750	7200	755	755	0,09	0,10
26/05/2015	7,29	37,3	7,205	36,6	9150	7025	755	755	0,08	0,11
28/05/2015	7,3	34,7	7,346	35,4	8850	5300	589	423	0,07	0,08

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 16 – Monitorização dos sólidos totais e sólidos voláteis nos digestores

	Sólidos totais (%massa)		Sólidos voláteis (%massa)	
	DIGESTOR 1	DIGESTOR 2	DIGESTOR 1	DIGESTOR 2
05/02/2015	3,74%	3,93%	53,06%	51,30%
10/02/2015	3,94%	3,75%	48,37%	47,62%
17/02/2015	3,81%	3,70%	29,53%	26,17%
24/02/2015	4,43%	4,40%	45,76%	46,39%
05/03/2015	3,87%	4,14%	45,22%	43,59%
10/03/2015	3,69%	4,02%	43,62%	44,23%
17/03/2015	4,22%	4,32%	44,31%	45,06%
23/03/2015	4,10%	4,94%	47,83%	45,83%
30/03/2015	3,03%	2,63%	47,50%	45,79%
31/03/2015	4,29%	3,85%	41,57%	39,49%
09/04/2015	4,28%	4,53%	43,79%	42,74%
10/04/2015	4,28%	4,14%	52,30%	50,83%
14/04/2015	4,18%	4,51%	56,86%	47,22%
21/04/2015	4,39%	4,62%	47,98%	45,41%
23/04/2015	4,17%	5,47%	48,54%	52,04%
28/04/2015	2,14%	5,51%	43,90%	43,60%
05/05/2015	1,47%	5,44%	40,35%	42,65%
07/05/2015	2,22%	5,97%	44,32%	46,32%
12/05/2015	4,92%	4,29%	31,63%	45,24%
14/05/2015	3,56%	4,85%	31,43%	46,35%
18/05/2015	5,35%	5,71%	53,43%	51,48%
26/05/2015	3,16%	3,73%	53,85%	49,32%

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 17- Monitorização da concentração de azoto amoniacal (mg/L).

	Digestor 1 (mg/L)	Digestor 2 (mg/L)
24/02/2015	834	718
13/03/2015	1178	1132
16/03/2015	666	704
17/03/2015	1188	1182
18/03/2015	1198	1126
19/03/2015	1344	1074
20/03/2015	1188	1136
23/03/2015	1162	1120
24/03/2015	1152	1210
25/03/2015	1188	1136
26/03/2015	746	794
16/04/2015	372	360
21/04/2015	478	400
28/04/2015	337,5	340
30/04/2015	592	767,5
05/05/2015	700	896
07/05/2015	202	394
13/05/2015	58	344
15/05/2015	164	284
19/05/2015	224	470
23/05/2015	158	972
27/05/2015	198	438
29/05/2015	422	976

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 18- Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

DIGESTOR 1				ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR			TEMPERATURA	
FEVEREIRO	Nível m³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	2000	24	3,1	2,8	75,0	Alternada		
2	2001	11	3,1	3,9	75,0	Alternada	37,9	37,4
3	1978	24	3,1	3,9	75,0	Alternada	38	37,6
4	1961	0		0	70,8	Alternada	38,4	38
5	2025	21	3,1	3,8	75,0	Alternada	38,2	37,9
6	1993	10	3,1	4	75,1	Alternada	38,4	38,1
7	2062	17	3	3,7	75,0	Alternada	38,2	37,9
8	2134	10	3	3,4	74,8	Alternada		
9	2160	20	3,1	3,7	71,3	Alternada	38,7	38,4
10	2040	17	2,5	3,3	73,3	Alternada	38,4	38,1
11	2004	11	2,1	3,2	59,8	Alternada	38,2	38
12	1948	15	3,1	3,4	75,0	Alternada	37,9	37,9
13	1986	16	3,1	3,4	75,0	Alternada	38,5	38,2
14	208	22	3,1	3,8	75,0	Alternada		
15	2034	14	2,2	3,6	75,0	Alternada		
16	1990	9	3,1	3,6	52,6	Alternada	38	37,7
17	1967	15	3,1	3,6	73,9	Alternada	37,8	37,8
18	1890	19	3,1	3,9	75,1	Alternada	38,1	37,4
19	1967	18	3,1	4,1	75,1	Alternada	38,2	37,9
20	1890	29	3,1	3,8	75,0	Alternada	38,7	38,4
21	1844	21	3,1	3,7	75,0	Alternada	38,2	37,8
22	1833	12	3,1	3,6	75,1	Alternada	38,1	37,7
23	2009	18	2,5	3,5	60,8	Alternada	38,4	38
24	1972	14	3,1	3,1	75,0	Alternada	37,9	37,5
25	1912	19	3,1	3,5	75,0	Alternada	37,8	37,7
26	1881	12	3,6	3,9	86,4	Alternada	38,2	37,9
27	1841	23	3,2	3,7	75,0	Alternada	38,4	37,9
28	1842	23	3,2	3,7	75,0	Alternada		

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 19 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

FEVEREIRO	DIGESTOR 2			ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR			TEMPERATURA	
	Nível m³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	2003	25	3,7	0,8	82,0	Alternada		
2	2020	10	3,7	3,5	82,0	Alternada	37,9	37,8
3	1951		3,5	3,5	82,0	Alternada	38,2	37,9
4	1954	19			78,9	Alternada	38,1	37,9
5	2014	0	4	5,7	82,0	Alternada	38,2	38
6	2030	17	3,8	3,3	80,4	Alternada	38,5	38,2
7	2052	9	3,3	3,4	82,0	Alternada	38	37,4
8		8			77,2	Alternada		
9	2163		3,5	2,9	69,0	Alternada	37,9	37,8
10	2049	11	2,8	3,2	69,7	Alternada	37,8	37,8
11	1006	17	2,5	3	59,8	Alternada	38,1	37,5
12	1008	19	3,3	3,3	78,4	Alternada	38,2	37,6
13	1981	10	3,6	5,4	82,0	Alternada	38	37,7
14	2059	17	3,4	3,6	82,0	Alternada		
15	2082	13	2	3,5	82,0	Alternada		
16	2009	22	3	3,2	49,2	Alternada	38,2	37,9
17	2008	14	3,6	3,2	70,2	Alternada	37,9	37,6
18	1909	9	3,4	5,2	82,0	Alternada	38	37,7
19	1806	13	3,9	4,6	79,6	Alternada	38,2	37,8
20	1908	13	3,6	5	82,0	Alternada	38,1	37,7
21	1984	21	3,4	4,3	82,0	Alternada		
22					77,7	Alternada		
23	1977	22	2,7	3,8	63,9	Alternada	38,2	37,9
24	1915	9	3,3	4,3	77,9	Alternada	38,1	37,7
25	1984	17	3,8	6,2	82,0	Alternada	37,9	37,5
26	1835	12	4,7	7,2	106,7	Alternada	38,1	37,4
27	1825	16	4,4	6,9	101,0	Alternada	38,3	37,6
28	1907	21	3,6	3,6	90,1	Alternada		

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 20 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

DIGESTOR 1				ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR		TEMPERATURA		
MARÇO	Nível m ³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m ³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m ³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	1924	3,4	2,3	4	14,3	Alternada		
2	1901	3,8	2,9	4	35,1	Alternada	37,8	37,5
3	1884	3,3	2,2	11	45,0	Alternada	37,9	37,7
4	1849	2,8	2,9	15	50,0	Alternada	38,4	37,8
5	1819	3,1	2,6	14	55,0	Alternada	38,3	38
6	1820	3,1	2,9	9	60,0	Alternada	38,4	38
7	1890	3,1	2,9	9	65,0	Alternada		
8	1998	3,5	2,5	17	58,6	Alternada		
9	1946	3,4	3,2	14	70,0	Alternada	38,2	37,7
10	1907	3,4	3,3	14	70,0	Alternada	38	37,8
11	1940	3,5	3,2	12	75,0	Alternada	37,9	37,5
12	1862	4,2	3,1	8	75,0	Alternada	37,8	37,4
13	1899	4,6	3,9	12	75,0	Alternada	37,9	37,6
14	1850	4,2	3,7	16	83,0	Alternada		
15	1938	4	3,8	12	83,0	Alternada		
16	1960	4,1	3,9	17	90,0	Alternada	38,4	37,7
17	1938	4,3	4,1	12	90,0	Alternada	37,5	37,1
18	1960	4,2	3,9	16	90,0	Alternada	37,6	37,2
19	1907	4,3	3,6	13	75,0	Alternada	37,4	37,4
20	1877	4,2	3,7	16	75,0	Alternada	37,6	37,2
21	1935	4,2	3,5	8	75,0	Alternada		
22	1985	4	3,3	10	75,0	Alternada		
23	1952	3,6	3,4	12	79,4	Alternada	37,9	37,5
24	1998	3,3	3,3	15	75,0	Alternada	37,8	37,5
25	2007	3,2	3,2	17	75,0	Alternada	37,6	37,3
26	1959	3,1	3,2	22	75,0	Alternada	37,8	37,2
27	1912	2,8	3,1	21	75,0	Alternada	37,9	37,5
28	1860	0,2	3,5	13	74,6	Continua		
29	1974	0,6	3,3	25	75,0	Continua		
30	1943	2,6	2,3	14	59,2	Continua	37,5	37,5
31	1878	1,5	3,2	26	75,0	Continua	37,7	37,5

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 21 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

DIGESTOR 2			ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR			TEMPERATURA		
MARÇO	Nível m³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	1930	7	2,9	3,5	15,8	Alternada		
2	1927	7	4,2	4	35,3	Alternada	37,9	37,8
3	1901	5	3,7	3,7	48	Alternada	37,8	37,8
4	1845	6	3	3,1	53	Alternada	37,9	37,8
5	1829	8	2,8	3,2	58	Alternada	37,4	37,4
6	1804	7	2,9	2,8	63	Alternada	38,2	37,8
7	1920	7	2,1	2,8	70	Alternada		
8	1944	15	2,1	3	62,7	Alternada		
9						Alternada	37,9	37,8
10	1956	13	3,2	3,3	76	Alternada	37,8	37,8
11	1859	13	3,5	3,3	83	Alternada	38,1	37,5
12	1861	12	3,5	3,4	83	Alternada	38,2	37,6
13	1878	5	3,7	4,3		Alternada	38	37,7
14	1892	13	3,4	4,1	83	Alternada		
15	1976	23	3,5	3,2	83	Alternada		
16	1979	8	3,3	3,2	83	Alternada	38	37,7
17	1909	19	3,9	3,2	75	Alternada	37,9	37,5
18	1892	8	3,8	3,2	75	Alternada	38,1	37,4
19	1953	21	3,8	3,3	70	Alternada	38,3	37,6
20	1942	6	3,3	3,2	75	Alternada	38,1	37,7
21	1940	9	3,5	3,1	75	Alternada		
22	2010	20	3,4	3	75	Alternada		
23	2044	10	3,3	3,2	75	Alternada	38,2	37,9
24	1970	9	3,5	3,5	77	Alternada	38,1	37,7
25	1922	11	3,3	3,4	75	Alternada	38,4	38
26	1910	16	3,3	3,3	75	Alternada	38,5	38
27	1826	15	3,5	2,9	75	Alternada	38,2	37,9
28	1951	21	3,3	0,9	75	Continua		
29	1950	21	3,3	0,6	75	Continua		
30	1955	5	3,2	2,6	75	Continua	38,2	38
31	1948	17	3,2	1,2	75	Continua	38,5	38,2

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 22 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

ABRIL	DIGESTOR 1		ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR				TEMPERATURA	
	Nível m³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	1943	18	3,1	0,7	75	Continua	38,0	37,7
2	1817	11	3,1	1,2	75	Continua	38,1	37,9
3	1834	16	2,9	0,5	70	Continua	37,9	37,7
4	1892	19	2,7	2,6	65,3	Alternada	-	-
5	1929	20	3,1	3,3	75	Alternada	-	-
6	1938	22	3,1	2,7	75	Continua	38,4	38,0
7	1874	17	3,1	0,4	75	Continua	38,2	37,8
8	1835	20	3,1	0,5	75	Continua	37,9	37,5
9	1846	15	3,1	0,8	75	Continua	37,3	37,1
10	1847	12	3,1	0,7	75	Continua	38,0	37,8
11	1961	41	3,1	0,5	75	Continua	-	-
12	2081	21	3,1	0,7	75	Continua	-	-
13	2000	19	3,1	1,5	75	Continua	37,9	37,6
14	1943	34	3,1	0,9	75	Continua	38,2	37,9
15	1873	38	3,1	0,8	75	Continua	38,1	37,8
16	1839	41	3,1	0,8	75	Continua	38,4	37,7
17	1949	16	3,3	0,4	75	Continua	37,5	37,1
18	2070	21	4,2	0,6	75	Continua	-	-
19	1998	19	3,3	0,8	75	Continua	-	-
20	2070	14	3,2	0,8	75	Continua	37,6	37,2
21	1983	34	3,1	0,7	75	Continua	38,1	37,8
22	1930	35	3,2	0,4	75	Continua	38,2	37,7
23	1876	41	3,3	0,2	75	Continua	37,9	37,5
24	1877	13	3	1,1	73	Continua	37,8	37,5
25	1851	13	3,2	2,4	75	Continua	-	-
26	1986	11	4,7	0,2	75	Continua	-	-
27	2095	22	3,1	1,4	75	Continua	37,9	37,5
28	2019	36	3,1	2,2	75	Continua	37,5	37,3
29	1943	23	3,2	0,4	75	Continua	37,8	37,5
30	1892	45	3,2	0,2	75	Continua	37,5	37,5

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 23 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores.

DIGESTOR 2			ALIMENTAÇÃO AO DIGESTOR			TEMPERATURA		
ABRIL	Nível m³ suspensão	Desvio padrão (nível suspensão)	Caudal m³ suspensão.h ⁻¹	Desvio Padrão (caudal)	Total m³ Suspensão/dia	Regime	T _{entrada} T°C	T _{Saída} T°C
1	1842	40	3,2	0,5	75	Continua	38,1	37,9
2	1814	10	3,5	0,9	75	Continua	37,9	37,4
3	1815	11	3	0,4	70	Continua	38,0	37,6
4	1870	16	2,7	2,7	63,7	Alternada	-	-
5	1936	20	3,2	3,3	75	Alternada	-	-
6	1940	5	5,1	1,7	75	Continua	38,4	38,1
7	1863	17	3,1	0,2	75	Continua	38,2	37,9
8	1839	17	3,1	0,2	75	Continua	37,8	37,8
9	1822	11	3,1	0,4	75	Continua	38,7	38,4
10	1813	10	3,1	0,2	75	Continua	38,4	38,1
11	1880	20	3,1	0,3	75	Continua	-	-
12	1953	21	3,3	3	75	Continua	-	-
13	2005	17	3,6	7	75	Continua	38,2	37,8
14	1945	3	6,2	5,7	75	Continua	37,9	37,9
15	1863	15	4,9	4,6	75	Continua	38,5	38,2
16	1840	8	4,3	4,3	75	Continua	38,3	37,8
17	1822	9	4,1	4,3	75	Continua	38,1	37,4
18	1883	16	5,2	8,1	75	Continua	-	-
19	1929	10	6,5	9,4	75	Continua	-	-
20	1945	22	7,7	1,8	150	Continua	38,1	37,4
21	1922	3	4,7	0,7	90	Continua	38,2	37,9
22	1868	17	3,5	3	84,6	Continua	38,0	37,7
23	1857	14	3,3	2,9	80	Continua	37,8	37,8
24	1827	14	3,2	0,2	76	Continua	38,1	37,7
25	1899	15	3,8	1,1	75	Alternada	-	-
26	1969	16	4	2,2	75	Continua	-	-
27	2019	17	3,2	1	75	Continua	38,2	37,9
28	1955	16	3,3	0,4	75	Continua	38,2	37,9
29	1885	15	3,6	0,8	75	Continua	38,4	37,9
30	1887	7	3,9	0,2	75	Continua	38,1	37,8

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 24 - Monitorização parâmetros de operação dos digestores – Desidratação da suspensão.

	FEVEREIRO		MARÇO		ABRIL		MAIO	
	Caudal (m³/h)	Total (m³)	Caudal (m³/h)	Total (m³)	Caudal (m³/h)	Total (m³)	Caudal (m³/h)	Total (m³)
1	-	-	-	-	12,28	294,84	4,95	118,86
2	6,45	154,80	5,74	137,87	8,65	207,70	-	-
3	11,10	266,42	5,93	142,40	4,45	106,85	-	-
4	4,10	98,47	5,99	143,77	-	-	9,66	231,89
5	1,26	30,17	6,67	160,17	-	-	7,19	172,46
6	5,38	129,21	4,98	119,63	7,34	176,08	14,46	347,02
7	3,67	88,10	-	-	11,46	275,10	13,00	311,94
8	-	-	-	-	9,98	239,57	13,63	327,04
9	3,95	94,91	5,94	142,53	8,35	200,34	3,44	82,57
10	10,96	262,95	9,98	239,40	8,63	207,06	-	-
11	9,94	238,63	8,89	213,26	-	-	8,69	208,62
12	9,50	227,92	7,15	171,63	-	-	11,75	281,89
14	11,13	267,05	5,65	135,69	9,02	216,42	12,00	287,90
14	3,54	85,01	3,76	90,13	12,79	306,95	9,54	228,95
15	-	-	-	-	12,98	311,47	10,75	258,06
16	6,70	160,69	5,18	124,44	9,35	224,48	1,15	27,59
17	8,46	203,06	10,68	256,35	8,89	213,32	-	-
18	9,91	237,74	7,13	171,00	-	-	5,93	142,43
19	10,57	253,64	2,00	47,93	-	-	7,46	179,11
20	10,56	253,41	5,74	137,82	7,76	186,22	8,59	206,21
21	0,16	3,95	3,19	76,46	13,63	327,11	11,98	287,46
22	-	-	-	-	12,73	305,51	12,43	298,26
23	6,89	165,35	6,37	152,98	8,82	211,58	9,86	236,62
24	11,34	272,09	9,78	234,75	10,84	260,06	-	-
25	8,82	211,59	9,79	234,90	-	-	7,10	170,33
2	9,82	235,80	11,25	269,94	-	-	12,01	288,17
27	5,56	133,38	10,31	247,47	9,47	227,26	8,57	205,59
28	-	-	-	-	14,43	346,33	6,00	143,97
29	-	-	-	-	14,06	337,40	-	-
30	-	-	5,71	137,07	10,39	249,46	-	-
31	-	-	9,72	233,17	-	-	-	-

Anexo III Monitorização Aterro

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 25 - Monitorização Dreno 1.

Dia	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Velocidade (m/s)	Caudal biogás (Nm ³ /h)	Caudal CH ₄ (Nm ³ /h)	Pressão relativa (mbar)
26/fev	23,0	19,0	7,7	0,30	2,75	0,63	0,87
27/fev	4,0	27,7	17,2	0,30	2,75	0,11	0,34
02/mar	34,4	27,7	2	0,30	2,75	0,95	- 0,13
03/mar	62,2	36,3	0	1,50	13,77	8,57	- 8,34
04/mar	35,7	33,2	0,9	0,30	2,75	0,98	- 0,36
05/mar	53,7	34,9	0	0,15	1,38	0,74	- 0,18
06/mar	62,2	36,8	0	0,10	0,92	0,57	- 0,12
09/mar	61,9	38,2	0,1	0,11	0,99	0,62	- 0,13
10/mar	31,0	30,4	1,9	0,93	8,49	2,63	- 1,11
11/mar	30,2	29,0	2,3	0,82	7,50	2,26	- 0,98
12/mar	58,8	36,9	0	0,13	1,22	0,72	- 0,16
13/mar	61,2	37,7	0	0,08	0,69	0,42	- 0,09
16/mar	63,0	39,1	0,1	0,18	1,68	1,06	- 0,22
17/mar	44,4	39,2	0	0,82	7,50	3,33	- 0,98
18/mar	61,5	37,9	0	0,19	1,76	1,08	- 0,23
19/mar	61,6	38,7	0,1	0,17	1,53	0,94	- 0,20
20/mar	51,4	37,8	0,1	0,32	2,91	1,49	- 0,38
23/mar	48,6	37,7	0	0,45	4,13	2,01	- 0,54
24/mar	47,4	34,9	0	0,78	7,12	3,37	- 0,93
25/mar	48,1	39,5	0	0,54	4,97	2,39	- 0,65
26/mar	26,0	28,8	2,6	1,08	9,95	2,59	- 1,30
27/mar	57,1	35,1	0	0,28	2,60	1,49	- 0,34
30/mar	60,6	37,5	0	0,19	1,76	1,07	- 0,23
31/mar	40,3	37,7	0	0,21	1,91	0,77	- 0,25
01/abr	48,9	38,0	0	0,10	0,92	0,45	- 0,12
06/abr	61,1	37,6	0	0,43	3,98	2,43	- 0,52
07/abr	58,3	36,9	0	0,11	0,99	0,58	- 0,13
09/abr	60,6	36,9	0	0,90	8,26	5,01	- 1,08
10/abr	27,0	28,4	2,5	0,28	2,60	0,70	- 0,34
14/abr	52,7	37,6	0	0,45	4,13	2,18	- 0,54
27/abr	59,2	36,7	0	0,18	1,68	1,00	- 0,22
28/abr	60,5	37,5	0	0,23	2,07	1,25	- 0,27
05/mai	62,2	37,2	0	0,27	2,45	1,52	- 0,32
06/mai	59,3	37,0	0	0,45	4,13	2,45	- 0,54
07/mai	59,3	37,5	0,1	0,35	3,21	1,91	- 0,42

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 26 – Monitorização Dreno 2.

Dia	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Velocidade (m/s)	Caudal biogás Nm ³ /h, gás húmido	Caudal CH ₄ Nm ³ /h, gás húmido	Depressão (mbar)
23/fev	33,5	76	0,1				0,17
24/fev	32,9	63,4	0	0,3	2,75	0,91	-0,23
25/fev	35	63,8	0	0,3	2,75	0,96	-0,08
26/fev	35,1	63,1	0	0,3	2,75	0,97	-0,22
27/fev	36	63	0	0,3	2,75	0,99	-0,26
02/mar	38,5	61,4	0	0,3	2,75	1,06	-0,19
03/mar	38,5	59,3	0	0,3	2,75	1,06	-0,17
04/mar	40,3	61	0	0,3	2,75	1,11	-0,28
05/mar	38,8	57,4	0,1	0,36	3,35	1,30	-0,23
06/mar	41,5	56,7	0	0,38	3,51	1,45	-0,22
17/mar	29,5	34,5	2,7	0,25	2,26	0,67	-0,23
18/mar	49,1	50,4	0	0,17	1,57	0,77	-0,16
19/mar	51	55,4	0,3	0,32	2,91	1,49	-0,296
20/mar	42,8	53,4	0,3	0,21	1,97	0,84	-0,2
23/mar	46	48	0	0,19	1,77	0,81	-0,18
24/mar	47,5	51	0	0,20	1,87	0,89	-0,19
25/mar	47,8	47,7	0	0,15	1,38	0,66	-0,14
26/mar	49,3	47,7	0	0,34	3,15	1,55	-0,32
27/mar	48	43,7	0	0,19	1,77	0,85	-0,18
30/mar	52	36,9	0	0,11	0,98	0,51	-0,1
31/mar	46,7	60,4	0	0,18	1,67	0,78	-0,17
01/abr	50,5	45,1	0	0,20	1,87	0,94	-0,19
06/abr	54,3	45,7	0	0,21	1,97	1,07	-0,2
07/abr	52,3	45,5	0,1	0,17	1,57	0,82	-0,16
09/abr	53,1	46	0	0,19	1,77	0,94	-0,18
10/abr	55,5	49,6	0	0,26	2,36	1,31	-0,24
14/abr	49,2	43,2	0	0,28	2,56	1,26	-0,26
27/abr	46,8	37,1	0	0,62	5,71	2,67	-0,58
28/abr	52,5	40,5	0	0,20	1,87	0,98	-0,19
05/mai	56,2	41,9	0	0,51	4,72	2,65	-0,48
06/mai	52,1	40	0	0,48	4,43	2,31	-0,45
19/mai	52,8	36,9	0,1	0,63	5,80	3,06	-0,59

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 27 – monitorização dreno 3.

Dia	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Velocidade (m/s)	Caudal biogás Nm ³ /h, gás húmido	Caudal CH ₄ Nm ³ /h, gás húmido	Depressão (mbar)
25/fev	58,9	36,8	0,1	5,10	46,83	27,58	-2,52
26/fev	54,2	36	0	5,70	52,34	28,37	-4,52
27/fev	57	34,3	0	5,40	49,58	28,26	-4,23
02/mar	58,3	37,2	0	6,10	56,01	32,65	-5,02
03/mar	58	37,5	0	6,10	56,01	32,48	-4,99
04/mar	58,1	37,6	0	6,20	56,93	33,07	-5,09
05/mar	56,6	36,7	0	7,32	67,22	38,04	-6,01
06/mar	55,8	36,7	0	5,88	54,02	30,14	-4,83
09/mar	53,5	36,3	0	5,15	47,31	25,31	-4,23
10/mar	55,7	38,4	0,1	6,37	58,49	32,58	-5,23
11/mar	52,4	38	0,2	4,92	45,18	23,68	-4,04
12/mar	55,7	35,8	0	7,00	64,31	35,82	-5,75
13/mar	56,1	36,8	0	6,07	55,70	31,25	-4,98
16/mar	54,6	38,1	0,1	3,47	31,87	17,40	-2,85
17/mar	55,4	38,3	0	4,00	36,68	20,32	-3,28
18/mar	55,5	37	0	2,87	26,39	14,65	-2,36
19/mar	55,5	38,1	0,1	3,48	31,99	17,75	-2,86
20/mar	54,1	38,1	0,1	4,20	38,58	20,87	-3,45
23/mar	52,6	38	0	4,69	43,06	22,65	-3,85
24/mar	39	35	0	4,67	42,83	16,71	-3,83
25/mar	55,1	42,7	0	1,63	14,99	8,26	-1,34
26/mar	48,2	37,7	0	2,23	20,47	9,86	-1,83
27/mar	56,7	37,2	0	2,85	26,17	14,84	-2,34
30/mar	56,4	37,7	0	1,24	11,41	6,43	-1,02
31/mar	52,5	36,5	0	2,47	22,70	11,92	-2,03
01/abr	50,8	44,4	0	3,80	34,89	17,73	-3,12
06/abr	55,1	38	0	2,73	25,05	13,80	-2,24
07/abr	52,8	38,3	0	4,52	41,49	21,91	-3,71
09/abr	54,5	37,2	0	2,73	25,05	13,65	-2,24
10/abr	56,2	39	0	3,18	29,19	16,40	-2,61
14/abr	54	38,8	0	2,30	21,14	11,41	-1,89
27/abr	58,2	37,4	0	2,27	20,80	12,11	-1,86
28/abr	59,7	38,9	0	1,88	17,22	10,28	-1,54
05/mai	60	38,7	0	2,30	21,14	12,68	-1,89
06/mai	60,4	38,9	0	2,47	22,70	13,71	-2,03
07/mai	60,7	40	0	1,86	17,11	10,39	-1,53
19/mai	56,1	38,2	0	2,35	21,59	12,11	-1,93

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 28 - Monitorização drenos 4

Dia	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	Velocidade (m/s)	Caudal biogás (Nm ³ /h, gás húmido)	Caudal CH ₄ (Nm ³ /h, gás húmido)	Depressão (mbar)
24/fev	52	33,5	1,1	12,9	118,4	61,5	-60,4
25/fev	65,6	38,9	0	8,6	78,9	51,8	-35,86
26/fev	63,9	37,7	0	10,5	96,4	61,6	-38,4
27/fev	65,5	38,2	0	10,5	96,4	63,1	-25,78
02/mar	59,2	36,4	0	11,2	102,8	60,8	-42,34
03/mar	60,3	36,6	0	11,1	101,9	61,4	-37,42
04/mar	58,1	37,1	0,1	10,4	95,4	55,4	-43,23
05/mar	57,4	37,4	0,4	10,7	99,0	56,8	-44,86
06/mar	61,2	37,6	0	9,4	86,9	53,1	-39,34
09/mar	59,9	36,3	0	10,5	96,6	57,8	-43,74
10/mar	46,7	36,7	2,5	9,7	89,1	41,6	-40,34
11/mar	63,3	40	0,3	10,1	93,5	59,2	-42,37
12/mar	60,5	36,9	0	9,5	88,0	53,2	-39,86
13/mar	60,1	37,8	0	7,7	70,7	42,5	-32,03
16/mar	58,1	38,9	0,3	9,3	86,1	50,0	-38,98
17/mar	59	38,7	0	8,8	81,2	47,9	-36,78
18/mar	58,1	37,2	0	8,9	82,4	47,8	-37,32
19/mar	57,3	38,1	0,1	9,2	84,9	48,6	-38,45
20/mar	61,5	39,5	0,2	7,9	72,5	44,6	-32,86
23/mar	58,9	38,9	0	8,3	76,6	45,1	-34,71
24/mar	57,5	36,9	0,2	7,1	65,4	37,6	-29,65
25/mar	63,6	42,7	0	6,9	63,7	40,5	-28,86
26/mar	56,3	48,2	0	6,9	63,4	35,7	-28,73
27/mar	56,7	36,5	0,4	7,9	72,7	41,2	-32,93
30/mar	58,3	36,9	0,4	8,0	74,2	43,3	-33,63
31/mar	60,4	34,7	0,3	7,0	65,0	39,2	-29,45
01/abr	56,8	44,6	0,6	5,8	53,2	30,2	-24,12
06/abr	62,1	38,9	0	6,2	57,4	35,6	-26,02
07/abr	53,3	38,3	0,2	8,4	77,2	41,1	-34,98
09/abr	61,4	36,7	0	6,4	59,5	36,5	-26,97
10/abr	61,7	38,1	0,2	5,6	51,5	31,8	-23,34
14/abr	60,4	38,2	0,3	6,3	57,9	34,	-26,23
27/abr	61,4	38,5	0	4,7	43,6	26,0	-19,76
28/abr	61,9	38,4	0	6,2	57,3	3551	-25,97
05/mai	62	37,7	0	6,9	63,7	3952	-28,86
06/mai	56,1	40,1	0	5,6	51,5	2892	-23,34
07/mai	62,7	39,3	0,2	6,2	57,2	3588	-25,91
19/mai	55,7	36,9	0,3	6,4	59,4	33,13	-26,93

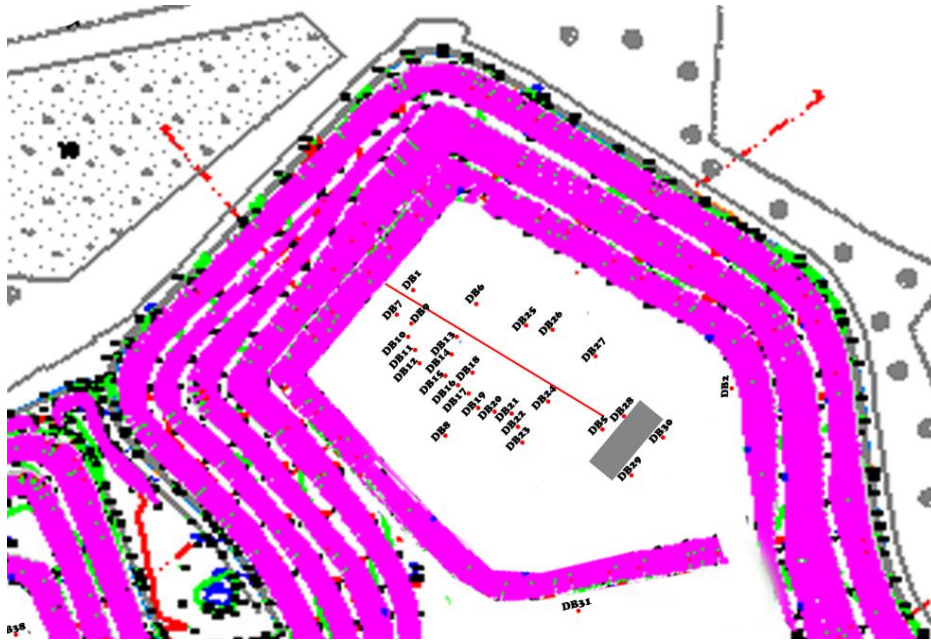


Figura 86 – Representação gráfica dos drenos das áreas 1,2 e 3

Tabela 29 – Composição e caudal de biogás Área 1

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB1	56,3	38,7	0,2	1,55	-0,11	14,2
DB6	60,2	38,3	0,2	5,23	-12,81	47,4
DB25	54,7	37,0	1,7	3,69	-55,19	32,1
DB26	57,4	37,7	0,3	3,66	-0,76	33,6
DB27	57,7	38,2	0,3	3,45	-0,99	31,6

Tabela 30 - Composição e caudal de biogás Área

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB7	54,2	38,3	0,2	4,4	-2,19	40,3
DB8	60,8	38,2	0,1	1,35	-28,61	12,0
DB9	58,4	39,7	0,2	3,63	-63,84	31,2
DB10	60,08	40,4	0	2,41	-0,28	22,1
DB11	59,6	40,7	0,1	1,97	-2,11	18,0
DB12	62,1	40,4	0,1	1,34	0,22	12,3
DB13	61,3	40,5	0,1	2,87	-48,7	25,1
DB14	38,3	26,9	5,8	1,02	-47,7	8,9
DB15	61,9	44,4	0,1	1,46	0,18	13,4
DB16	61,8	40,4	0,2	2,95	-0,66	27,0
DB17	62	41,2	0,2	1,78	-0,22	16,3
DB18	61,2	40,2	0,2	2,12	-52,07	18,4
DB19	60,4	43,5	0,1	2,54	-0,23	23,3
DB20	62,4	40,4	0,2	2,72	-0,28	24,9
DB21	59,2	40,7	0,1	2,63	-0,42	24,1
DB22	58,5	45,9	0	1,17	-0,32	10,7
DB23	63,6	39,9	0	0,99	-50,52	8,6
DB24	61,3	40	0	6,32	-54,4	54,9

Tabela 31- Composição e caudal de biogás Área 3

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB2	61,7	38,6	0	5,67	-17,33	51,2
DB5	61,2	38,2	0,1	3,4	-14,65	30,7
DB29	64	36,2	0,2	3,05	-22	27,4
DB30	59,2	38,2	0,3	2,86	-52,12	26,2
DB28	57,7	38,8	0,2	5,32	-28,61	47,4

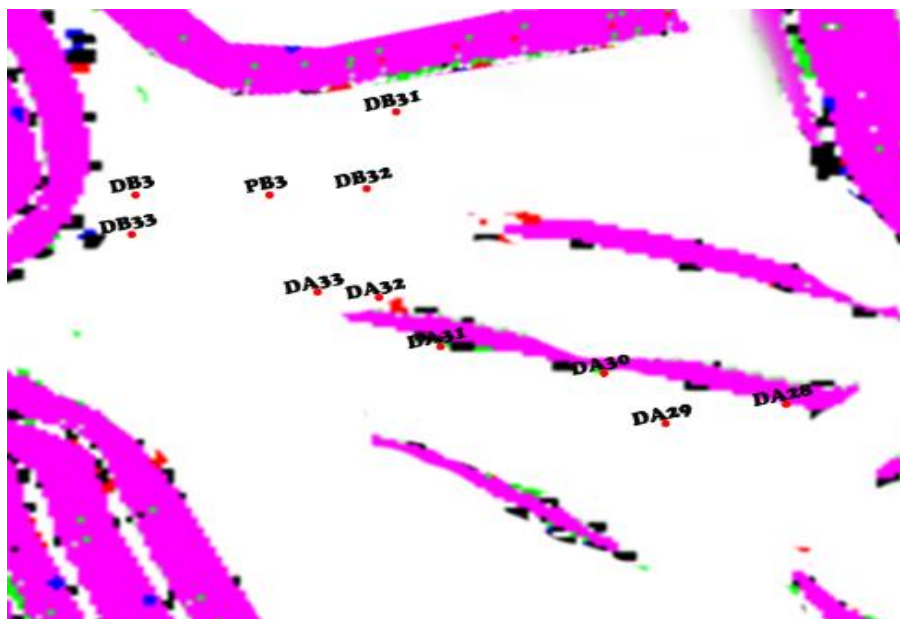


Figura 87 - Representação gráfica dos drenos das áreas 4 e 5

Tabela 32 - Composição e caudal de biogás Área 4

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB3	24,8	28,8	0,7	0,75	-0,24	6,8
DB31	36,5	21,5	7,2	0,91	-0,99	8,3
DB32	55	35,6	0,2	1,55	-0,07	14,2
DB33	61,4	37,9	0	1,73	8,86	16,0
PB3	58,3	40,3	0,2	1,12	-14,63	10,1

Tabela 33 - Composição e caudal de biogás Área 5

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DA28	43,6	37,7	4,7	0,78	-0,1	7,1
DA29	62,6	40,5	0	0,85	-0,11	7,5
DA30	61,7	39	0,2	0,55	44,59	5,2
DA31	61,1	40,1	0	0,65	0,18	5,9
DA32	60,6	42,3	0	0,83	-19,3	7,4



Figura 88 - Representação gráfica dos drenos das áreas 6, 7 e 8

Tabela 34- Composição e caudal de biogás Área 6

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmedos)
PA8	45,7	32,5	3,7	1,46	-0,15	13,4
PA10	63,8	38,1	0,2	0,74	-43,4	6,5
PA2	60,1	37,9	0	0,52	-0,23	4,7
PA1	57,1	37,8	0	0,91	-2,82	8,3
PC9	62,4	36,9	0,2	5,69	-38,29	50,2
PA3	53,9	37,7	1,3	0,88	-2,11	8,1
PB2	54,5	36,3	1,5	0,85	-18,84	7,6
PC8	60,2	39,2	0,2	0,75	0,11	6,8
PA4	62,3	37,7	0	0,59	34,83	5,6
pc5	0,5	0,6	18,9	0	-58,55	0,0
PA5	0,8	1	18,9	0,65	-1,65	5,9
PA6	62,7	40,9	0	1	-0,21	9,1
PA9	30,7	31,7	0,1	0,5	-8,61	4,5
PA7	60,1	38,7	0,1	0,52	34,84	4,9

Tabela 35 - Composição e caudal de biogás Área 7

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB34	61,7	39	0,2	0,55	44,59	5,2
DB35	61,1	40,1	0	0,65	0,18	5,9
DB36	60,6	42,3	0	1,12	-19,3	10,1
DB37	61,4	38,2	0,1	1,02	-13,12	9,3
DB38	60,1	43,2	0,2	0,68	-43,41	6,0
DB39	26,9	21,4	8,4	3,6	-65,42	30,9
DB50	57,3	38,4	0,2	1,46	-4,52	13,3
DB51	58,9	37,6	0,2	0,86	-34,64	7,6
DB53	63,4	39,4	0	0,83	-1,76	7,6
DB54	43	35,7	0,5	1,02	-0,91	9,3
DB55	33	30	0	1,03	-0,65	9,4
DB56	35,9	32,9	4,2	0,61	-0,11	5,6
PB1	53,9	37,2	0,1	1,25	-48,47	10,9

Tabela 36 - Composição e caudal de biogás Área 8

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DB40	59,5	44,3	0,6	0,83	-69,8	7,1
DB41	61,6	43,1	0	0,91	-59,3	7,8
DB43	39,2	23,7	7,5	0,61	-0,03	5,6
DB45	59,1	45,8	0,2	0,24	0,31	2,2
DB46	60,2	43,8	0,1	2,51	-69,23	21,4
DB47	54,6	38,5	0,6	2,18	-0,62	20,0
DB48	59,2	38,2	0,1	0,46	6,93	4,2
DB49	60,2	37,8	0,1	6,12	2,18	56,3
DB52	45,2	38,3	0,1	0,32	-0,33	2,9
PB8	60,2	43,8	0,1	2,51	-69,23	21,4
PB6	61,6	43,1	0	0,61	-69,03	5,2
PB4	62,8	41,4	0,1	0,56	-7,86	5,1
PB5	60,2	37,8	0,4	0,54	9,72	5,0
PB7	9,6	5,9	16,9	0,36	-1,55	3,3
PB9	61,2	38,2	0,2	0,46	6,93	4,2

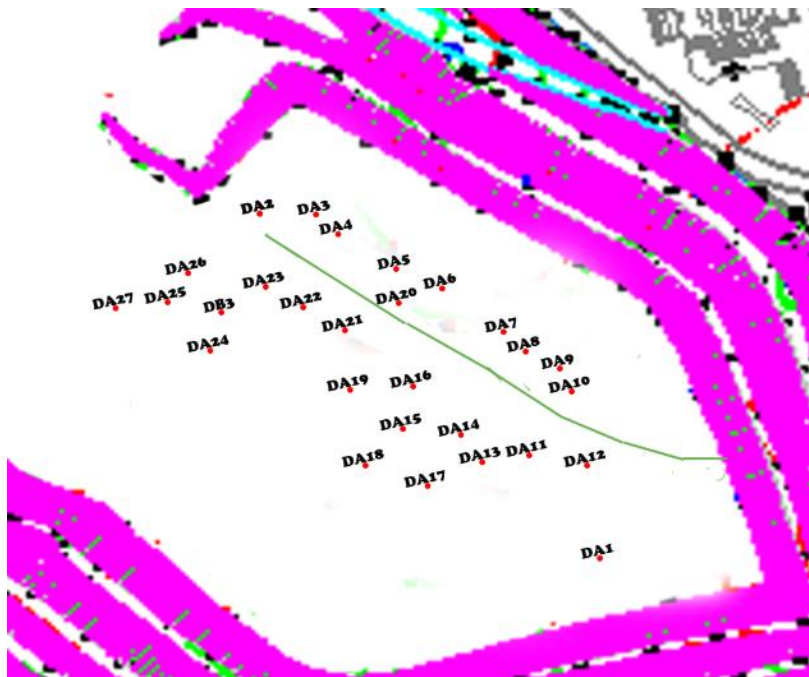


Figura 89 - Representação gráfica dos drenos das áreas 9 e 10

Tabela 37 - Composição e caudal de biogás Área 9

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DA2	59	39,5	0,3	0,87	-22,84	7,8
DA3	62,7	38,9	0,2	0,82	-33,9	7,3
DA4	63	38,3	0,3	0,99	-24,85	8,9
DA5	57,5	39,2	0	0,86	-50,86	7,5
DA6	58,8	39,6	0,5	0,73	-48	6,4
DA20	39,5	33,8	0	0,83	-0,16	7,6
DA7	60,7	39,7	0,5	0,98	-48	8,6
DA8	64,4	39,7	0	0,7	-53,84	6,1
DA9	63,3	38,3	0,1	1,34	-53,34	11,7
DA10	64,2	39,4	0	0,96	-54,16	8,3

Tabela 38 - Composição e caudal de biogás Área 10

Referência	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	v (m/s)	Depressão (mbar)	Caudal (Nm ³ /h, gases húmidos)
DA11	38,4	24,6	1,1	0,94	-5,24	8,5
DA12	36,9	40,3	7,7	0,71	-12,4	6,4
DA13	63,7	39,9	0,3	0,63	-21,96	5,6
DA14	59,8	37,2	0,1	0,68	-14,85	6,2
DA15	32,8	29,5	2,5	0,79	-0,87	7,3
DA16	36,9	33,4	0	0,77	-0,14	7,1
DA17	39,2	32,8	0,3	0,71	-0,08	6,5
DA18	54,3	26,6	1,9	0,71	-1,13	6,5
DA19	17,9	15,3	8,6	0,74	0,57	6,8
DA21	55,8	38	0	1,07	-0,16	9,8
DA22	33,5	34	0,1	0,99	-43,48	8,7
DA23	46,5	34,4	0	0,61	-1,54	5,6
DA24	42	28,7	0,7	0,85	-79,89	7,2
DA25	62,6	40,5	0	1,52	-0,24	13,9
DA26	41,6	29,8	0,5	1,41	-2,15	12,9
DA27	59,5	39,7	0	0,91	-0,28	8,3
DB4	60	38,4	0	1,73	-2,12	15,8
DA1	60,6	37,1	0,2	2,05	-78,09	17,4

Anexo IV- Monitorização CVE

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 39 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor 1

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	449	50%	37%	1%	40	847	0,95	2 247	37,7%
19 Maio	488	46%	36%	1%	53	875	0,95	2 230	39,2%
20 Maio	476	45%	36%	1%	50	850	0,95	2 136	39,8%
21 Maio	514	42%	34%	2%	31	850	0,95	2 163	39,3%
22 Maio	345	39%	34%	3%	30	524	0,95	1 325	39,6%
25 Maio	428	47%	35%	1%	93	800	0,95	2 025	39,5%
26 Maio	583	45%	35%	2%	172	1 048	0,95	2 634	39,8%
27 Maio	485	44%	33%	2%	57	800	0,95	2 114	37,9%
28 Maio	467	46%	34%	1%	97	825	0,95	2 133	38,7%
29 Maio	446	49%	37%	1%	103	825	0,95	2 156	38,3%

Tabela 40 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor 2

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	487	50%	37%	1%	40	949	0,95	2438	38,9%
19 Maio	484	46%	36%	1%	53	875	0,95	2211	39,6%
20 Maio	491	45%	36%	1%	50	875	0,95	2203	39,7%
21 Maio	532	42%	34%	2%	31	850	0,95	2239	38,0%
22 Maio	351	39%	34%	3%	30	532	0,95	1348	39,5%
25 Maio	433	47%	35%	1%	93	800	0,95	2047	39,1%
26 Maio	585	45%	35%	2%	172	1000	0,95	2643	37,8%
27 Maio	472	44%	33%	2%	57	800	0,95	2057	38,9%
28 Maio	475	46%	34%	1%	97	825	0,95	2171	38,0%
29 Maio	441	49%	37%	1%	103	825	0,95	2133	38,7%

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 41- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 2

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	525	50%	37%	1%	40	997	0,95	2628	37,9%
19 Maio	523	46%	36%	1%	53	875	0,95	2389	36,6%
20 Maio	503	45%	36%	1%	50	875	0,95	2257	38,8%
21 Maio	512	42%	34%	2%	31	850	0,95	2155	39,4%
22 Maio	552	39%	34%	3%	30	813	0,95	2119	38,4%
25 Maio	454	47%	35%	1%	93	800	0,95	2146	37,3%
26 Maio	472	45%	35%	2%	172	800	0,95	2132	37,5%
27 Maio	439	44%	33%	2%	57	750	0,95	1913	39,2%
28 Maio	462	46%	34%	1%	97	825	0,95	2112	39,1%
29 Maio	452	49%	37%	1%	103	825	0,95	2186	37,7%

Tabela 42- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 4

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	435	50%	37%	1%	40	901	0,95	2392	37,7%
19 Maio	454	46%	36%	1%	53	875	0,95	2279	38,4%
20 Maio	464	45%	36%	1%	50	875	0,95	2287	38,3%
21 Maio	486	42%	34%	2%	31	850	0,95	2247	37,8%
22 Maio	492	39%	34%	3%	30	800	0,95	2076	38,5%
25 Maio	404	47%	35%	1%	93	800	0,95	2098	38,1%
26 Maio	289	45%	35%	2%	172	532	0,95	1434	37,1%
27 Maio	448	44%	33%	2%	57	800	0,95	2146	37,3%
28 Maio	435	46%	34%	1%	97	825	0,95	2182	37,8%
29 Maio	413	49%	37%	1%	103	825	0,95	2196	37,6%

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás

Tabela 43- Monitorização e cálculo do rendimento Motor 4

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	286,0	50%	37%	1%	40,0	532	0,92	1431	37%
19 Maio	298,0	46%	36%	1%	53,0	532	0,92	1361	39%
20 Maio	302,0	45%	36%	1%	50,0	532	0,92	1355	39%
21 Maio	324,7	42%	34%	2%	31,0	532	0,92	1366	39%
22 Maio	362,2	39%	34%	3%	30,0	532	0,92	1390	38%
25 Maio	292,2	47%	35%	1%	93,0	532	0,92	1381	39%
26 Maio	305,2	45%	35%	2%	172,0	532	0,92	1378	39%
27 Maio	357,0	44%	33%	2%	57,0	600	0,92	1555	39%
28 Maio	351,4	46%	34%	1%	97,0	600	0,92	1604	37%
29 Maio	329,5	49%	37%	1%	103,0	600	0,92	1593	38%

Tabela 44 - Monitorização e cálculo do rendimento Motor CVO

	Caudal biogás (Nm3/h)	CH₄ (%)	CO₂ (%)	O₂ (%)	H₂S (ppm)	Energia elétrica produzida (kWh)	Cos Φ	E_{fornecida} (kWh)	Rendimento elétrico
18 Maio	350	65%	38%	0%	>>>	751	0,95	2258	33,3%
19 Maio	322	64%	36%	0%	>>>	750	0,95	2061	36,4%
20 Maio	300	64%	37%	0%	>>>	750	0,95	1902	39,4%
21 Maio	333	64%	40%	0%	>>>	750	0,95	2138	35,1%
22 Maio	309	63%	38%	0%	>>>	700	0,95	1950	35,9%
25 Maio	226	66%	35%	0%	93	600	0,95	1478	40,6%
26 Maio	335	63%	35%	0,3%	>>>	700	0,95	2091	33,5%
27 Maio	344	61%	36%	0,2%	>>>	750	0,95	2078	36,1%
28 Maio	322	64%	38%	0,2%	>>>	750	0,95	2061	36,4%

Monitorização de um sistema de valorização energética do biogás